



**Rui Manuel Carvalho dos Santos  
de Azevedo Antunes**

Mestre

## **Controlo em Sistemas de Interação Humano-Máquina**

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em  
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor Luís Filipe Figueira Brito Palma,  
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Coorientador: Prof. Doutor Hermínio Duarte-Ramos, Professor  
Catedrático Jubilado, Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Manuel Camarinha de Matos

Arguentes: Prof. Doutor António Dourado Pereira Correia  
Prof. Doutor João Miguel Raposo Sanches

Vogais: Prof. Doutor José Miguel Costa Dias Pereira  
Prof. Doutor Manuel Martins Barata  
Prof. Doutor Luís Filipe Figueira Brito Palma  
Prof. Doutor João Almeida das Rosas



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Outubro, 2018**

Página em branco



## **Controlo em Sistemas de Interação Humano-Máquina**

A elaboração desta dissertação beneficiou do regime de isenção de propinas de doutoramento, no âmbito do Protocolo de Cooperação existente entre a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e o Instituto Politécnico de Setúbal.

Copyright © Rui Manuel Carvalho dos Santos de Azevedo Antunes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*The Faculdade de Ciências e Tecnologia and the Universidade Nova de Lisboa have a right, perpetual and without geographical limits, of filing and publishing this dissertation through printed examples reproduced in paper or in the digital form, or for any other known way or that might be invented, and of spreading it through scientific repositories and of admitting its copy and distribution with education or investigation objectives, without commercial intents, as credit is given to the author and publisher.*

Página em branco

*Dedico este trabalho à Paula, à Joana, à minha Mãe  
e gostava ainda de homenagear a memória  
do meu Pai e dos meus Avós*



*“Puzzle”, Joana, 4 de  
Setembro, 2015 (pintura)*

Página em branco

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao meu orientador científico, Professor Doutor Luís Filipe Figueira Brito Palma, pelas suas qualidades científicas, humanas, de investigação e pela motivação, partilha de conhecimentos, amizade e incentivo dado à minha autonomia. Agradeço também ao meu coorientador científico, Professor Doutor Hermínio Duarte-Ramos, pelo constante incentivo e acompanhamento, pela sua experiência científica e académica, pelas suas qualidades humanas e espírito visionário, e por me ter dado a oportunidade de poder realizar este trabalho na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL).

Gostaria ainda de agradecer ao Professor Doutor Fernando José Vieira do Coito, Coordenador da Área de Sistemas do Departamento de Engenharia Eletrotécnica da FCT-UNL, pelos contributos dados para este trabalho e por ter beneficiado, ao longo destes anos, das suas qualidades científicas, humanas, de investigação e de organização.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica da FCT-UNL as condições disponibilizadas para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também ao Centro de Tecnologias e Sistemas do Instituto de Desenvolvimento de Novas Tecnologias (CTS-Uninova) e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo apoio financeiro no âmbito do projeto UID/EEA/00066/2013. Agradeço ao Professor Doutor Luís Manuel Camarinha de Matos, Coordenador do Programa Doutoral em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (PDEEC) da FCT-UNL, pelo acompanhamento ao longo do Curso, e pela constante motivação e incentivo.

Ao Instituto Politécnico de Setúbal (IPSetúbal), à Escola Superior de Tecnologia de Setúbal do IPSetúbal e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia, em particular ao Programa de apoio à formação avançada de docentes do Ensino Superior Politécnico (PROTEC), agradeço a dispensa de serviço docente de três semestres e o apoio dado para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Mestre João Manuel da Costa e Cruz pelo apoio na iniciação ao  $\text{\LaTeX}$ , ao Mestre Vasco da Silva Brito, do CTS-Uninova, pelos conselhos para o desenho de peças para impressão 3D, e ao Técnico responsável pelo Laboratório de Fabricação (FabLab) da FCT-UNL, Filipe André Antão Silvestre, pelo apoio na utilização da máquina de corte a *laser*.

Gostaria de agradecer a todos os professores e funcionários com quem lidei, pelo contributo e pela ajuda prestada e a todos os meus colegas e amigos pelos encorajamentos, amizade e apoio.

Agradeço também a todos os participantes que se voluntariaram de forma incansável para as diversas experiências realizadas no âmbito deste trabalho, bem como ao Hospital Nossa Senhora da Arrábida (HNSA), à Associação Portuguesa de Esclerose Lateral Amiotrófica (APELA) e à Cooperativa para a Educação e Reabilitação de Cidadãos Inadaptados do Seixal e Almada (CERCISA). A participação, o interesse dos voluntários e o apoio destas instituições constituem um importante estímulo à continuação da investigação em torno deste tema.

Finalmente, quero ainda expressar os meus agradecimentos à minha Mãe e ao meu Pai pelo apoio e confiança que sempre me deram. Agradeço também à Paula o incentivo, a amizade e o carinho permanentes durante este percurso de inovação científica. À Joana, deixo este texto, por entre algumas histórias que ficaram por ler.

Página em branco

# Resumo

---

O projeto de sistemas humano-máquina ainda se encontra focado nos aspetos ergonómicos da operação, negligenciando outros fatores, igualmente importantes, tais como a forma e o modo como o operador humano aprende e utiliza a máquina. Uma das principais razões que leva a esta situação atual tem a ver com o facto de, normalmente, as condições associadas à máquina não poderem ser alteradas tendo em conta o desempenho ou a destreza do seu operador, requerendo-se assim um esforço adicional em tempo de operação e treino. Além do mais, é necessário salientar que, em qualquer tarefa manual, sob um dispositivo mecatrónico, o operador fará sempre parte integrante do sistema de controlo em anel fechado, pelo que o fator humano deverá ser tido em conta.

O trabalho descrito nesta dissertação aborda o estudo e o desenvolvimento de novas metodologias e técnicas para a melhoria do desempenho do operador em dispositivos humano-máquina, explorando diversos conceitos teóricos e estratégias, designadamente a modelagem e a identificação dos sistemas humano-máquina, o controlo humano-máquina e a otimização, a transferência de aprendizagem/conhecimento, a assistência ao operador e a análise do desempenho. Confirma-se a eficiência e aplicabilidade desses métodos, sendo expostas as suas potencialidades. As técnicas apresentadas nesta dissertação são validadas experimentalmente com dados provenientes dos diversos sistemas de interface utilizados.

Atualmente, as implicações para o desenvolvimento e utilização de sistemas automáticos de adaptação humano-máquina são promissoras, já que conduzem à melhoria do desempenho, da usabilidade e da segurança. Exemplos para tais aplicações podem ser encontrados em diversas áreas, desde a tecnologia assistiva, a medicina, a teleoperação, o entretenimento, a produção industrial, a indústria automóvel e a aviação, entre outras.

**Palavras-chave:** Controlo humano-máquina, Transferência de aprendizagem/conhecimento, Análise de desempenho, Interfaces humano-máquina, Dispositivos eletrónicos de assistência, Tecnologia assistiva.

---

Página em branco



# Abstract

---

Traditionally the design of human-machine systems is still focused on the ergonomic aspects of the operation, often disregarding other equally important factors such as the way humans learn and use the machines. One of the main reasons which lead to the present situation has to do with the fact that the machine conditions usually do not change, regardless of the human's skill/dexterity, often requiring an additional operation time and training effort. Besides, one should emphasize that in any manual task under a mechatronic device, the operator always belongs to the closed loop control system, and the human factor should be taken into account.

The work described in this thesis addresses the study and the development of new methodologies and techniques for improving the operator skills under human-machine devices, exploring several theoretical concepts and strategies, namely the modelling and identification of human-machine systems, the human-machine control and optimization, the transfer learning/knowledge, the operator assistance and the skill analysis. The efficiency and applicability of these methods is confirmed, and its strengths are exposed. The techniques presented in this thesis are validated experimentally with data obtained from the several interface systems used.

Nowadays, the implications for the development and use of automatic human-machine adaptation systems are promising, since they lead to the improvement of skills, usability, and security. Examples for such applications can be found in several areas, such as in assistive technology, medicine, teleoperation, entertainment, industrial production, automotive industry and aviation, among others.

**Keywords:** Human-machine control, Transfer learning/knowledge, Skill analysis, Human-machine interfaces, Electronic assistance devices, Assistive technology.

---

Página em branco

# Sumário

Agradecimentos . . . . .	vii
Resumo . . . . .	ix
Abstract . . . . .	xi
Índice de figuras . . . . .	xvii
Índice de tabelas . . . . .	xxv
Índice de algoritmos . . . . .	xxvii
Abreviaturas . . . . .	xxix
Simbologia (por temas) . . . . .	xxxv
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e motivação . . . . .	1
1.1.1 Questões de investigação . . . . .	4
1.1.2 Hipóteses . . . . .	4
1.1.3 Método de investigação adotado . . . . .	5
1.2 Objetivos . . . . .	6
1.3 Contribuições originais . . . . .	8
1.4 Estrutura da dissertação . . . . .	12
1.4.1 Organização geral . . . . .	12
1.4.2 Convenções . . . . .	12
<b>2 Estado da arte</b>	<b>13</b>
2.1 Evolução histórica . . . . .	13
2.2 Mecatrónica adaptada ao humano . . . . .	19
2.3 Metodologias para sistemas de assistência humano-máquina . . . . .	21
2.4 Tecnologias e aplicações de sistemas humano-máquina . . . . .	25
2.5 Alguns projetos em curso sobre fatores humanos . . . . .	28
<b>3 Modelagem, identificação e controlo de sistemas HMI</b>	<b>31</b>
3.1 Introdução . . . . .	31
3.2 Modelagem de sistemas de interação humano-máquina . . . . .	32
3.2.1 Modelo para classificação de bandas de frequências . . . . .	33
3.2.2 Modelagem ARX . . . . .	39
3.2.3 Modelagem baseada em função de transferência . . . . .	40

3.3	Identificação de sistemas de interação humano-máquina . . . . .	40
3.3.1	Identificação do modelo para classificação de frequências . . . . .	40
3.3.2	Análise da resposta transiente . . . . .	41
3.3.3	Identificação de função de transferência . . . . .	43
3.3.4	Tempo de atraso . . . . .	44
3.3.5	Identificação pelo método melhorado de análise em frequência . . . . .	44
3.4	Projeto de controladores com integração do humano . . . . .	50
3.4.1	Compensadores de deslocamento de fase . . . . .	51
3.4.2	Controlador proporcional, integral e derivado, com <i>anti-windup</i> . . . . .	52
3.4.3	Controlador ótimo linear quadrático gaussiano . . . . .	54
3.4.4	Controlador de assistência com base em transferência de conhecimento . . . . .	55
3.4.5	Sintonia de controladores através de otimização inspirada na natureza . . . . .	60
3.4.6	Conceção de controladores em sistemas humano-máquina . . . . .	63
3.5	Análise de desempenho dos sistemas humano-máquina . . . . .	64
3.5.1	Análise de desempenho baseada na lei de Fitts . . . . .	65
3.5.2	Medidas de desempenho baseadas na exatidão e no esforço . . . . .	69
3.5.3	Medidas de desempenho em tecnologia assistiva . . . . .	72
3.5.4	Análise de desempenho com base em componentes principais . . . . .	73
<b>4</b>	<b>Resultados experimentais e validação</b>	<b>77</b>
4.1	Aquisição de dados . . . . .	77
4.2	Classificação de frequências e aprendizagem supervisionada . . . . .	79
4.2.1	Entrada de teste da rede neuronal . . . . .	81
4.2.2	Treino da rede neuronal . . . . .	81
4.2.3	Resultados do sistema de classificação . . . . .	84
4.3	Seguimento unidimensional . . . . .	86
4.3.1	Modelo ARX humano-máquina . . . . .	87
4.3.2	Modelo SISO e compensador humano-máquina . . . . .	90
4.3.3	Modelo com base em sinais de seguimento, e controlador LQG HuIL . . . . .	95
4.4	Seguimento multidimensional . . . . .	101
4.4.1	Modelo MIMO e compensador humano-máquina . . . . .	101
4.4.2	Modelo MIMO e controlador humano-máquina . . . . .	105
4.4.3	Análise de desempenho baseada em PCA . . . . .	114
4.4.4	Seguimento ponto-a-ponto . . . . .	120
4.5	Controlo assistido e transferência de conhecimento . . . . .	123
4.5.1	Análise de correlação . . . . .	124
4.5.2	Sintonia do controlador de assistência . . . . .	128
4.5.3	Implementação em <i>hardware</i> do sistema de apoio ao condutor . . . . .	131
4.5.4	Análise dos resultados experimentais . . . . .	133
4.5.5	Considerações sobre a transferência de aprendizagem . . . . .	138
4.6	Projeto de sistemas de controlo para tecnologia assistiva . . . . .	139

4.6.1	Visão computacional . . . . .	139
4.6.2	Dispositivos microeletromecânicos . . . . .	147
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>167</b>
5.1	Síntese do trabalho de investigação . . . . .	167
5.2	Perspetivas de desenvolvimento futuro . . . . .	172
	<b>Apêndices</b>	<b>173</b>
A	Quaterniões de Hamilton . . . . .	173
B	Terminologia . . . . .	175
C	Lista de publicações . . . . .	181
C.1	Publicações em revistas . . . . .	181
C.2	Publicações em capítulos de livros . . . . .	182
C.3	Publicações em conferências . . . . .	182
D	Índice remissivo . . . . .	185
	<b>Bibliografia</b>	<b>191</b>

Página em branco

# Índice de figuras

1.1	“Mosaico” com imagens de Interfaces Humano-Computador. . . . .	2
1.2	Principais etapas do método tradicional de investigação. . . . .	5
1.3	Diferentes abordagens de controlo em sistemas humano-máquina. . . . .	8
1.4	Configurações do Dispositivo de Interface Humana desenvolvido. . . . .	10
1.5	Aplicação de <i>software</i> desenvolvida em linguagem de programação C#, para utilização conjunta com o Dispositivo de Interface Humana. . . . .	11
2.1	Diagrama de blocos que ilustra os diversos elementos do paradigma do seguimento manual. . . . .	14
2.2	Diagrama de blocos do sistema de controlo ótimo associado ao desempenho dos pilotos. . . . .	16
2.3	Modelo geral de aprendizagem por realimentação do erro. . . . .	17
2.4	Diagrama de blocos do modelo de Controlo por Identificação e Seleção. . . . .	17
2.5	Utilização de Espetroscopia de Infravermelho Próximo (NIRS) para a análise da atividade do córtex cerebral. . . . .	18
2.6	Imagens topográficas, obtidas através de NIRS, da atividade do córtex cerebral de operadores humanos com diferentes níveis de desempenho. . . . .	18
2.7	Ilustração do sistema de controlo através do Educador de Desempenho proposto por Kobayashi et al.. . . . .	19
2.8	Diagrama adaptado de interligação das principais disciplinas associadas ao conceito da HAM. . . . .	20
2.9	Diagrama de blocos de um sistema de assistência com Mecatrónica Adaptada ao Humano. . . . .	21
2.10	Diagrama de blocos de um sistema humano-máquina, que inclui um modelo ARX do operador humano. . . . .	23
2.11	Fases de um sistema de Controlo Adaptativo Focado no Desempenho (SAC). . .	24
2.12	Plataforma ARDUINO® Due, contendo o microcontrolador SAM3X8E. . . . .	24
2.13	Computador de Placa Única Beaglebone™ Black. . . . .	25
2.14	Sistema cirúrgico laparoscópico da Vinci™. . . . .	25
2.15	Exemplos recentes de interfaces de comunicação sem fios. . . . .	26
2.16	Sistema de comunicação através do olhar EyeSpeak™. . . . .	27
2.17	Sensor de sopro sem contacto Quha Sento MP. . . . .	28

2.18	(a) Imagem por Tensor de Difusão das fibras nervosas presentes na substância branca do cérebro humano; (b) rede neuronal do cérebro humano. . . . .	29
3.1	Diagrama conceptual do modelo de classificação de sinais em gamas de frequências, baseado na percepção humana. . . . .	33
3.2	(a) Neurónio; (b) representação de um neurónio artificial genérico. . . . .	34
3.3	Rede genérica com $R$ entradas sequenciais, constituída por um único neurónio e por $(R - 1)$ atrasos $D$ . . . . .	35
3.4	Camada de uma rede neuronal com múltiplos neurónios genéricos. . . . .	36
3.5	Estrutura da rede neuronal de duas camadas proposta, para a classificação binária de sinais com diferentes gamas de frequências. . . . .	37
3.6	Representação simplificada do sistema humano-máquina em anel fechado. . . .	41
3.7	Diagrama de blocos do método melhorado de análise em frequência, para cada frequência angular múltipla $\omega_k$ . . . . .	46
3.8	Espectro de amplitude de um sinal unidimensional para seguimento, gerado a partir da soma de 30 frequências múltiplas compreendidas entre 0,0083 Hz e 10 Hz. . . . .	47
3.9	Amostras de uma experiência de seguimento unidimensional, para uma frequência de amostragem de 100 Hz. . . . .	48
3.10	(a) Experiência de seguimento manual através do ecrã; (b) visualização gráfica dos resultados. . . . .	51
3.11	Diagrama de blocos simplificado para o projeto de controlo humano-máquina. . .	51
3.12	Diagrama de blocos do controlador com <i>anti-windup</i> . . . . .	53
3.13	Diagrama de blocos de um sistema de controlo humano-máquina interagindo no processo $P(s)$ . . . . .	54
3.14	Ilustração conceptual de um sistema de assistência baseado no conceito de transferência de conhecimento. . . . .	55
3.15	Arquitetura do controlador de assistência baseado em transferência de conhecimento, para tarefas de condução num simulador. . . . .	59
3.16	Pirilampo ou vaga-lume da espécie <i>Photinus pyralis</i> . . . . .	60
3.17	Placa de Circuito Impresso contendo o microcontrolador ARM® Cortex®-M4 MK20DX256VLH7. . . . .	64
3.18	Ilustração do projeto baseado em modelos. . . . .	64
3.19	Controladores de assistência e de aquisição em Tempo-Real para tarefas de condução, implementados tendo em conta o paradigma do projeto baseado em modelos Simulink®. . . . .	65
3.20	Ação Ponto-a-Ponto (PTP) no Espaço Unidimensional (1D). . . . .	66
3.21	Diagrama conceptual do modelo de desempenho baseado na lei de Fitts, para a realização de uma tarefa Ponto-a-Ponto. . . . .	67
3.22	Representação no espaço 2D de uma sequência de quatro tarefas PTP. . . . .	67
3.23	Ação Ponto-a-Ponto no Espaço Bidimensional. . . . .	68



3.24	Diagrama conceptual do modelo de desempenho, tendo por base as medidas da exatidão e do esforço. . . . .	70
3.25	Diagrama de blocos conceptual do modelo corrente de desempenho para tecnologia assistiva. . . . .	72
3.26	Diagrama conceptual do modelo simplificado de desempenho para tecnologia assistiva, em tarefas Ponto-a-Ponto onde a distância a cada alvo, de igual dimensão, é constante. . . . .	73
3.27	Diagrama conceptual do modelo PCA de análise de desempenho. . . . .	74
4.1	Módulo <i>Bluetooth</i> <sup>®</sup> RN-42, utilizado na aquisição de dados. . . . .	78
4.2	(a) PCB, contendo o microcontrolador MK20DX256VLH7; (b) Carregamento do código. . . . .	78
4.3	Instrumento Virtual desenvolvido para as experiências de seguimento. . . . .	78
4.4	Aplicação desenvolvida em linguagem Processing 3, para a realização de experiências de seguimento Ponto-a-Ponto. . . . .	79
4.5	Diagrama conceptual do modelo de classificação em gamas de frequências. . . . .	79
4.6	Modelo proposto de Rede Neuronal Artificial de duas camadas ( $\{1\}$ e $\{2\}$ ), para a classificação binária de sinais com duas diferentes frequências. . . . .	80
4.7	Diagrama de blocos (Simulink <sup>®</sup> ) para a geração do sinal de entrada de teste da rede neuronal. . . . .	81
4.8	Sinal $p(k)$ de entrada de teste, utilizado para a validação experimental da rede neuronal proposta. . . . .	81
4.9	Resultados do treino da Rede Neuronal Artificial proposta, para diferentes taxas de aprendizagem $l_r$ . . . . .	82
4.10	Pesos da 2 <sup>a</sup> camada da rede neuronal proposta, para diferentes taxas de aprendizagem $l_r$ . . . . .	83
4.11	Sinal sinusoidal de entrada de teste $p(k)$ , e sinal de saída $u(k)$ da 1 <sup>a</sup> camada da rede neuronal. . . . .	85
4.12	Sinal de saída $u(k)$ da 1 <sup>a</sup> camada, e saídas $x_1(k)$ e $x_2(k)$ da 2 <sup>a</sup> camada da rede neuronal. . . . .	85
4.13	Saídas resultantes $a_1(k)$ e $a_2(k)$ da rede proposta, obtidas a partir do sinal de entrada $p(k)$ . . . . .	85
4.14	Saídas finais resultantes $a_1(k)$ e $a_2(k)$ da rede neuronal, obtidas a partir de um sinal de entrada $p(k)$ de dente de serra. . . . .	86
4.15	Diagrama de blocos proposto para o projeto de controlo humano-máquina no Espaço Unidimensional. . . . .	87
4.16	Configuração experimental para as experiências de seguimento a 1D em perseguição, utilizando um manípulo ( <i>joystick</i> ). . . . .	87
4.17	Respostas ao degrau e ao impulso do sistema humano-máquina. . . . .	88
4.18	(a) Manípulo ( <i>joystick</i> ) utilizado; (b) sinais de seguimento manual (primeiros 20 segundos). . . . .	89

4.19	Saídas obtidas (medida e do modelo) e diagrama de Bode de ganho do modelo humano-máquina sem atraso. . . . .	90
4.20	Espetro de amplitude de um sinal de seguimento, gerado pela soma de 30 frequências múltiplas compreendidas entre 0,0083 Hz e 10 Hz. . . . .	91
4.21	Sinais de seguimento unidimensional (primeiros 20 segundos), para uma frequência de amostragem de 100 Hz. . . . .	91
4.22	Diagrama de Bode de ganho dos modelos do sistema humano-máquina, obtidos a partir de 100 experiências de seguimento manual a 1D, para uma gama de frequências entre 0,02 Hz e 7 Hz. . . . .	92
4.23	Diagrama de blocos simplificado para o sistema humano-máquina com compensação. . . . .	93
4.24	Resposta ao degrau para dois sistemas de controlo em anel fechado (sem compensador, e com o compensador $C_3(s)$ desenvolvido), para uma dinâmica $P(s)$ e uma frequência de amostragem de 300 Hz. . . . .	93
4.25	Resposta ao degrau para dois sistemas de controlo em anel fechado (com os compensadores $C_1(s)$ e $C_2(s)$ ), para uma dinâmica $P(s)$ e uma amplitude da entrada de referência de 0,393. . . . .	94
4.26	Diagrama de blocos do sistema de controlo humano-máquina em anel fechado. .	95
4.27	Sinais de seguimento $x_1(t)$ , $x_2(t)$ e $x_3(t)$ , utilizados para a obtenção dos modelos do sistema humano-máquina. . . . .	96
4.28	Espetro dos sinais da entrada de referência $r_{1,2,3}(t) = x_1(t)$ , $x_2(t)$ , $x_3(t)$ . . . . .	96
4.29	Obtenção do modelo nominal $Q(s)$ , em anel aberto, do sistema humano-máquina, a partir das 180 respostas em frequência. . . . .	98
4.30	Seguimento manual (primeiro minuto) em $P(s)$ , para $x_1(t)$ , sem controlador. . .	99
4.31	Seguimento manual (primeiro minuto) em $P(s)$ , para $x_1(t)$ , com o controlador ótimo $C_{LQG}(s)$ . . . . .	99
4.32	Seguimento manual (segundo minuto) em $P(s)$ , para $x_2(t)$ , sem controlador. . .	99
4.33	Seguimento manual (segundo minuto) em $P(s)$ , para $x_2(t)$ , com o controlador ótimo $C_{LQG}(s)$ . . . . .	99
4.34	Seguimento manual (terceiro minuto) em $P(s)$ , para $x_3(t)$ , sem controlador. . . .	100
4.35	Seguimento manual (terceiro minuto) em $P(s)$ , para $x_3(t)$ , com o controlador ótimo $C_{LQG}(s)$ . . . . .	100
4.36	Evolução da média do erro absoluto, para uma janela temporal de um segundo. .	101
4.37	Diagramas de Bode de ganho dos modelos humano-máquina de anel aberto, obtidos para os eixos cartesianos X e Y. . . . .	102
4.38	Diagrama de blocos conceptual do sistema humano-máquina multivariável, a ser controlado com um processo instável (ex: propulsando uma massa pelo espaço, na ausência de gravidade). . . . .	103
4.39	Seguimento com processo instável, para um alvo móvel elipsoidal, sem compensadores. . . . .	104

4.40	Seguimento com processo instável, para um alvo móvel elipsoidal, com compensadores $C_{AF}(s)$ . . . . .	104
4.41	Seguimento com processo instável, para um alvo móvel elipsoidal, com compensadores $C_H(s)$ . . . . .	104
4.42	Espetro de amplitude de um sinal de entrada para seguimento, gerado a partir da soma de 30 frequências múltiplas, compreendidas entre 0,0083 Hz e 10 Hz. . . .	105
4.43	Sinal normalizado de entrada para uma experiência de seguimento. O período $T$ é 120 segundos e o deslocamento $x_0$ é 0,2. . . . .	106
4.44	Entrada e resposta no domínio do tempo (primeiros 20 segundos) de uma experiência de seguimento manual, para o eixo Y. . . . .	106
4.45	Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando $M_{yy}(s)$ . . . . .	107
4.46	Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando $M_{xx}(s)$ . . . . .	107
4.47	Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando $M_{yy}(s)$ . . . . .	108
4.48	Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando $M_{yx}(s)$ . . . . .	108
4.49	Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando $M_{xx}(s)$ . . . . .	109
4.50	Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando $M_{xy}(s)$ . . . . .	109
4.51	Espetros de amplitude para os sinais de entrada de seguimento relativos ao eixo Y e ao eixo X, gerados a partir da soma de frequências múltiplas, compreendidas entre 0,0083 Hz e 10 Hz. . . . .	110
4.52	Diagramas de Bode de ganho em anel aberto, representando as funções de transferência $M_{yy}(s)$ e $M_{yx}(s)$ do sistema humano-máquina. . . . .	110
4.53	Diagramas de Bode de ganho em anel aberto, representando as funções de transferência $M_{xx}(s)$ e $M_{xy}(s)$ do sistema humano-máquina. . . . .	111
4.54	Resposta no tempo para um alvo móvel poligonal octogonal de seguimento, com processo instável, sem controlador. . . . .	112
4.55	Resposta no tempo para um alvo móvel poligonal octogonal de seguimento, com processo instável, com os controladores $C_{LQG}(s)$ . . . . .	112
4.56	Resultados do seguimento com processo instável, sem controlador. . . . .	113
4.57	Resultados do seguimento com processo instável, com controladores $C_{LQG}(s)$ . . .	113
4.58	Evolução para uma janela temporal de dois segundos do erro quadrático cartesiano médio $M_{QE}$ (a) sem controlador; (b) com os controladores $C_{LQG}(s)$ . . . . .	114
4.59	Diagrama conceptual do modelo PCA de análise de desempenho. . . . .	115
4.60	Alvo de seguimento e resposta do operador, para o modelo PCA de análise de desempenho. . . . .	115
4.61	Sinal de entrada utilizado para o modelo PCA de análise de desempenho e resposta do operador para o tempo discreto, com duração de 2001 amostras (20 s). . .	116
4.62	Resposta no tempo para o alvo móvel de seguimento com duração temporal $T_e$ de 20 segundos. . . . .	116
4.63	Resposta no tempo para o alvo móvel de seguimento com duração temporal $T_e$ de 15 segundos. . . . .	117

4.64	Resposta no tempo para o alvo móvel de seguimento com duração temporal $T_e$ de 10 segundos. . . . .	117
4.65	Resposta no tempo para o alvo móvel de seguimento com duração temporal $T_e$ de 5 segundos. . . . .	117
4.66	Projeção PCA dos dados das experiências no espaço 2D de pontuações ( <i>scores</i> ). . . . .	118
4.67	(a) Representação de uma sequência de tarefas Ponto-a-Ponto, com diferentes índices de dificuldade $I_D$ ; (b) realização de uma tarefa Ponto-a-Ponto com a interface <i>pen tablet</i> num processo instável, de dificuldade acrescida. . . . .	120
4.68	Diagrama de blocos conceptual do sistema humano-máquina com a interface <i>pen tablet</i> . . . . .	121
4.69	Ações Ponto-a-Ponto (PTP), realizadas pelos operadores humanos A, B e C. . . . .	121
4.70	Ilustração conceptual do sistema de assistência com o condutor Humano Integrado no Anel. . . . .	123
4.71	Simulador de condução de Fórmula 1. . . . .	125
4.72	Respostas do condutor A e do condutor B numa volta completa da pista virtual de <i>Albert Park</i> , para uma frequência de amostragem de 100 Hz. . . . .	126
4.73	Resíduos $R_{\max}$ , $R_{\min}$ , $R_{\text{sum}}$ e $R_{\text{val}}$ para os condutores B e A de referência. . . . .	127
4.74	Agrupamentos obtidos para as amostras da melhor volta do: (a) condutor A; (b) condutor B. . . . .	129
4.75	Ângulo de viragem $\phi_v$ do volante e posições normalizadas dos pedais. . . . .	130
4.76	Arquitetura do controlador de assistência baseado em transferência de conhecimento, para tarefas de condução num simulador de Fórmula 1. . . . .	131
4.77	Arquitetura de <i>hardware</i> . . . . .	132
4.78	<i>Hardware</i> para aquisição em Tempo-Real e controlo (última versão, com aquisição de dados sem fios): 1-bloco de aquisição; 2-bloco de controlo; 3-bloco da interface; 4-módulo <i>Bluetooth</i> ® (BT). . . . .	132
4.79	Gráfico de probabilidade normal ( <i>rankit</i> ) para os dados de condução relativos ao condutor humano E. . . . .	136
4.80	Gráfico de probabilidade normal ( <i>rankit</i> ) para os dados de condução relativos ao condutor humano J. . . . .	137
4.81	Ilustração conceptual do sistema de assistência com FHCI. . . . .	139
4.82	Rastreamento facial em Tempo-Real, utilizando uma <i>webcam</i> , a Biblioteca de <i>Software</i> Livre de Visão Computacional (OpenCV) e a linguagem de programação Processing. . . . .	140
4.83	Arquitetura FHCI proposta. . . . .	140
4.84	Diagrama de blocos do sistema de assistência FHCI. . . . .	142
4.85	Diagrama do <i>hardware</i> do sistema de assistência humano-computador com base em Visão Computacional. . . . .	142
4.86	Ilustração conceptual de uma experiência PTP. . . . .	142
4.87	Interface de assistência desenvolvida, utilizada para as experiências PTP, com uma <i>webcam</i> . . . . .	144

4.88	Resultados experimentais dos erros quadráticos médios $MSE_X$ e $MSE_Y$ e do índice de desempenho $P_{in}$ para o utilizador A, sem controlador. . . . .	145
4.89	Resultados experimentais dos erros quadráticos médios $MSE_X$ e $MSE_Y$ e do índice de desempenho $P_{in}$ para o utilizador A, com o controlador de assistência. . .	145
4.90	Experiência de mãos livres no teclado virtual, com a interface de assistência. . .	146
4.91	Protótipo: (a) e (b) módulo HID; (c) dispositivo de comunicação escravo. . . . .	148
4.92	Dispositivo de comunicação mestre, com dimensões de $60 \times 21 \times 10$ mm. . . . .	148
4.93	Dispositivo escravo com ficha USB, com dimensões de $46 \times 22 \times 11$ mm. . . . .	148
4.94	Mapa mental dos elementos do protótipo de acesso ao computador. . . . .	149
4.95	Arquitetura do sistema de acesso ao computador para pessoas com necessidades especiais. . . . .	149
4.96	Desenhos (formato STL) das caixas do módulo HID, de colocação na cabeça. . .	150
4.97	Desenhos (formato STL) das caixas autoencaixáveis para os dispositivos de comunicação por <i>Bluetooth</i> ®: (a) e (b) mestre; (c) e (d) escravo. . . . .	150
4.98	Desenhos (formato STL) das caixas autoencaixáveis do módulo AHRS. . . . .	150
4.99	Arquitetura do sistema de acesso ao computador com ligação por cabo USB. . .	151
4.100	(a) Visualização, em Tempo-Real, da orientação ( <i>roll</i> $\phi$ , <i>pitch</i> $\theta$ e <i>yaw</i> $\psi$ ); (b) módulo AHRS. . . . .	152
4.101	Ângulos <i>roll</i> $\phi$ , <i>pitch</i> $\theta$ e <i>yaw</i> $\psi$ no Espaço Tridimensional. . . . .	152
4.102	Diferentes modos de funcionamento da aplicação de <i>software</i> para acesso ao computador. . . . .	154
4.103	Configurações da aplicação de <i>software</i> , desenvolvida em linguagem C# para o protótipo. . . . .	155
4.104	Aplicação, concebida em linguagem C#, para a leitura do estado e configuração do <i>hardware</i> . . . . .	155
4.105	Diagrama de blocos da interface humano-computador, em modo de “rato”. . . .	157
4.106	Arquitetura de controlo em cascata do sistema de acesso ao computador. . . . .	158
4.107	Convergência do algoritmo FA no espaço de procura $\{K_p, K_i, K_d\} \subset \mathbb{R}^3$ , com 20 pirilampos. . . . .	159
4.108	Aplicação para a realização de experiências PTP, com o dispositivo HID. . . . .	160
4.109	Sinais PTP dos alvos aleatórios de referência, em X e em Y, e de resposta do participante B, sem controlador. . . . .	161
4.110	Sinais PTP dos alvos aleatórios de referência, em X e em Y, e de resposta do participante B, com controlador. . . . .	161
4.111	Modelo tridimensional do homúnculo motor. . . . .	164
4.112	(a) <i>Software</i> Simplify3D®; (b) impressora 3D em funcionamento. . . . .	165
4.113	<i>Kit</i> de <i>hardware</i> do protótipo. . . . .	165

Página em branco

# Índice de tabelas

1.1	Exemplos de Interfaces Humano-Computador. . . . .	3
2.1	Exemplos de tecnologia assistiva. . . . .	27
3.1	Qualidade do modelo PCA para $m = 4$ . . . . .	76
4.1	Pesos da primeira camada <i>versus</i> taxa de aprendizagem. . . . .	84
4.2	Entradas de polaridade da segunda camada <i>versus</i> taxa de aprendizagem. . . . .	84
4.3	Atraso puro (segundos) para cinco experiências manuais de seguimento ao degrau e ao impulso. . . . .	89
4.4	Desempenho da resposta manual ao degrau do sistema humano-máquina (em 60 segundos) e margens de estabilidade, para o processo com dinâmica $P(s)$ . . . . .	94
4.5	Medidas de exatidão e de esforço sem controlador e com o controlador $C_{LQG}(s)$ , para uma experiência de seguimento unidimensional no processo $P(s)$ . . . . .	100
4.6	Medidas de exatidão e de esforço para a experiência de seguimento com processo $P(s)$ , sem e com compensadores $C_{AF}(s)$ e $C_H(s)$ . . . . .	105
4.7	Medidas de exatidão e de esforço para a experiência de seguimento com processo instável, sem e com os controladores $C_{LQG}(s)$ . . . . .	113
4.8	Qualidade do modelo PCA <i>versus</i> número de Componentes Principais. . . . .	119
4.9	Desempenho da tarefa de seguimento, utilizando o método de PCA. . . . .	119
4.10	Desempenho da tarefa de seguimento, utilizando o erro quadrático cartesiano médio $M_{QE}$ . . . . .	119
4.11	Coefficiente de determinação $R^2$ , para os operadores humanos A, B e C. . . . .	122
4.12	Índice de desempenho $J_{PTP}$ para os operadores humanos A, B e C. . . . .	122
4.13	Resíduos para o condutor de referência B. . . . .	128
4.14	Resíduos para o condutor de referência A. . . . .	128
4.15	Centroides dos agrupamentos 1, 2 e 3 para o condutor A e o condutor B. . . . .	129
4.16	Ajuste do ganho integral $K_i$ e do ganho derivado $K_d$ com base na saturação do volante $\phi_{sat_b}$ . . . . .	131
4.17	Média e desvio padrão dos tempos das voltas para todos os condutores, sem controlador e com os controladores B e A. . . . .	133
4.18	Resultados do esforço para os condutores humanos A a J, obtidos a partir das experiências realizadas no simulador de condução. . . . .	134

4.19 Índice de desempenho $I_{P_C}$ versus $\alpha_L$ , $\beta_L$ , $\gamma_L$ e $\delta_V$ , para o condutor humano A com o controlador de assistência A. . . . .	134
4.20 Índice de desempenho $I_{P_C}$ para todos os condutores. . . . .	135
4.21 Resultados das experiências PTP. . . . .	146
4.22 Resultados das experiências de mãos livres, com o teclado virtual. . . . .	147
4.23 Resultados das experiências PTP com o protótipo, sem e com os controladores, para uma sequência de 10 tarefas PTP aleatórias ( $n_{tar} = 10$ ), com a distância constante A aos alvos. . . . .	162
4.24 Função de custo $J_c$ ( $n_{tar} = 10$ ) e número de falhas $M(10)$ sem e com os controladores, para uma sequência de 10 tarefas PTP aleatórias ( $n_{tar} = 10$ ), com a distância constante A aos alvos. . . . .	163
4.25 Valores de desempenho dos participantes humanos A a E, sem e com os controladores. . . . .	163



# Índice de algoritmos

3.1	Aprendizagem por Mínimos Quadrados Médios. . . . .	41
3.2	Obtenção do tempo de atraso, da frequência de amostragem e do modelo ARX. . .	43
3.3	Implementação de um controlador PID com <i>anti-windup</i> . . . . .	54
3.4	Minimização da função de custo $J_{FCM}$ . . . . .	58
3.5	Estratégia de controlo com base em transferência de conhecimento. . . . .	59
3.6	Algoritmo dos Pirilampos. . . . .	62

Página em branco

# Abreviaturas

## Acrónimos

1D	Espaço Unidimensional
2D	Espaço Bidimensional
3D	Espaço Tridimensional
ARMA	Modelo Auto-Regressivo de Média Móvel
AME	Amiotrofia Espinal
ARX	Modelo Auto-Regressivo com Entradas Exógenas
BT	<i>Bluetooth</i> <sup>®</sup>
CPE	Co-Poliéster
DAQ	Sistema de Aquisição de Dados
EEG	Eletroencefalografia
EFX	Extensão de Efeitos
EMG	Eletromiografia
EOG	Eletro-oculografia
HuIL	Humano Integrado no Anel
I <sup>2</sup> C	Circuito Inter-integrado
LabVIEW <sup>®</sup>	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
MEMS	Sistema Microeletromecânico
MoCap	Captura de Movimento
MOSAIC	Controlo por Identificação e Seleção
MCU	Unidade de Microcontrolador
MPU	Unidade de Microprocessador
OpenCV	Biblioteca de <i>Software</i> Livre de Visão Computacional
ORCID <sup>®</sup>	<i>Open Researcher and Contributor ID</i>

PLA	Poliácido Láctico
PnP	<i>Plug and Play</i>
STL	<i>Stereolithography</i>
RTT	Síndrome de Rett

## Siglas

AAC	<i>Augmentative and Alternative Communication</i>
ABCA	Algoritmo de Colônia Artificial de Abelhas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ACO	Otimização por Colônia de Formigas
ADC	Conversor Analógico-Digital
AHRS	Sistema de Referência de Atitude e Rumo
AIAA	<i>American Institute of Aeronautics and Astronautics</i>
AM	Manufatura Aditiva
ANN	Rede Neuronal Artificial
AR	Realidade Aumentada
ARM®	Máquina Avançada com Conjunto Restrito de Instruções
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
BCI	Interface Cérebro-Computador
BA	Algoritmo Inspirado na Ecolocalização Utilizada Pelos Morcegos
BBO	Otimização Baseada em Biogeografia
BFOA	Algoritmo de Otimização do Forrageamento das Bactérias
BGA	<i>Ball Grid Array</i>
BLE	<i>Bluetooth®</i> de Baixo Consumo de Energia
BMI	<i>Brain Mobile Interfacing</i>
BRAIN®	<i>The Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies</i>
CMYK	Ciano-cor Púrpura-Amarelo-Principal/Preto
COE	Centro de Excelência
CSA	Algoritmo da Reprodução dos Pássaros Cuco
CT	Tomografia Computadorizada

CV	Visão Computacional
DAS	Sistema de Assistência ao Condutor
DC	Corrente Contínua
DDBSFM	Modelos de Retroação de Estados com Base em Dados Discretos
DFT	Transformada Discreta de Fourier
DIY	Faça Você Mesmo
DTI	Imagem por Tensor de Difusão
EDR	Taxa de Dados Melhorada
EEPROM	Memória Programável Apagável Apenas de Leitura
EKF	Filtro de Kalman Estendido
ELA	Esclerose Lateral Amiotrófica
EM	Esclerose Múltipla
EMBS	<i>Engineering in Medicine and Biology IEEE Society</i>
EPP	Exatidão Melhorada do Ponteiro
ERICA	<i>Eye-gaze Response Interface Computer Aid</i>
F1	Fórmula 1
FA	Algoritmo dos Pirilampos
FCM	Algoritmo Difuso de $c$ -Médias
FFF	Fabrico de Filamento Fundido
FHCI	Interação Facial Humano-Computador
FIR	Resposta ao Impulso Finita
FPA	Algoritmos Inspirados na Polinização de Flores
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
GA	Algoritmo Genético
GBS	Algoritmo de Procura Baseado em Galáxias
GNU	<i>GNU's Not Unix</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global
GUI	Interface Gráfica do Utilizador
HAM	Mecatrónica Adaptada ao Humano
HBP	Projeto Cérebro Humano
HCI	Interface Humano-Computador

HID	Dispositivo de Interface Humana
HMI	Interface Humano-Máquina
HMM	Modelo Oculto de Markov
HPI	Índice de Desempenho do Operador Humano
HRA	Avaliação da Confiabilidade Humana
HS	Algoritmo de Busca Harmónica
HSO	Operador com Alto Desempenho
ICA	Algoritmo de Competição Imperialista
ICS	Sistema Inteligente de Treino
ICSP	Programação Série no Circuito
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFAC	<i>International Federation of Automatic Control</i>
IFIP	<i>International Federation for Information Processing</i>
IMU	Unidade de Medição Inercial
ISODATA	<i>Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm</i>
IT	Tecnologia da Informação
IWD	Algoritmo de Gotas de Água Inteligentes
KF	Filtro de Kalman
LCD	<i>Display</i> de Cristal Líquido
LED	Díodo Emissor de Luz
LMS	Mínimos Quadrados Médios
LPF	Filtro Passa-Baixo
LQ	Linear Quadrático
LQE	Estimador Linear Quadrático
LQG	Linear Quadrático Gaussiano
LQR	Regulador Linear Quadrático
LS	Mínimos Quadrados
LSO	Operador com Baixo Desempenho
LTI	Linear Invariante no Tempo
MA	Algoritmo Memético

MARG	Magnético, Velocidade Angular, Gravidade
MIMO	Multi-Entradas, Multi-Saídas
MIS	Cirurgia Minimamente Invasiva
MOCM	Modelo Modificado de Controlo Ótimo
MRI	Imagem por Ressonância Magnética
MSO	Operador com Médio Desempenho
NIRS	Espetroscopia de Infravermelho Próximo
NP	Normas Portuguesas
OCM	Modelo de Controlo Ótimo
OCR	Reconhecimento Ótico de Caracteres
OHMD	<i>Optical Head-Mounted Display</i>
OLED	Díodo Emissor de Luz Orgânico
OS	Sistema Operativo
PC	Componentes Principais
PCA	Análise em Componentes Principais
PCB	Placa de Circuito Impresso
PCR	Regressão de Componentes Principais
PD	Controlador Proporcional e Derivado
PE	Educador de Desempenho
PI	Controlador Proporcional e Integral
PIC	Controlador de Interface Programável
PID	Controlador Proporcional, Integral e Derivado
PLS	Mínimos Quadrados Parciais
PS	Deslocamento de Fase
PSO	Otimização por Enxame de Partículas
PTP	Ponto-a-Ponto
PWM	Modulador de Largura de Impulso
QR	Resposta Rápida
RISC	Computador com Conjunto Restrito de Instruções
RPG	Jogo de Interpretação de Papéis
RT	Tempo-Real

RTW	<i>Real-Time Workshop</i>
SAC	Controlo Adaptativo Focado no Desempenho
SBC	Computador de Placa Única
SCRC	<i>Simulated Car Racing Championship</i>
SI	Sistema Internacional de unidades
SICE	<i>The Society of Instrument and Control Engineers</i>
SIGCHI	<i>Special Interest Group on Computer-Human Interaction</i>
SiP	<i>System in Package</i>
SISO	Uma Entrada e Uma Saída
SMD	Dispositivo de Montagem Superficial
SMT	Tecnologia de Montagem Superficial
SOA	Algoritmo de Otimização Espiral
SPI	Interface Série de Periféricos
SPP	Perfil de Porta Série
SSO	Otimização por Aranhas Sociais
STC	Síndrome do Túnel do Carpo
SVD	Decomposição em Valores Singulares
TDL	Linha de Atraso
ToF	Tempo-de-Voo
TORCS	<i>The Open Racing Car Simulator</i>
TTL	Lógica Transístor-Transístor
TUI	Interface Táctil de Utilizador
USB	Barramento Universal Série
VI	Instrumento Virtual
VR	Realidade Virtual
VSM	Modelo de Controlo de Estratégia Variável
WBAN	<i>Wireless Body Area Networks</i>
WCAG	Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo <i>Web</i>
WoS	<i>Web of Science</i>
ZOH	Retentor de Amostras de Ordem Zero



# Simbologia

$t$	Variável tempo
$k$	Ordem da amostra ou da frequência
$s$	Variável complexa de Laplace
$\omega$	Frequência angular
$\delta(t)$	Função delta de Dirac
$x(t), y(t)$	Sinais contínuos de entrada e de saída no instante $t$
$y(k)$	Sinal discreto de saída no instante $k$
$F_s$	Frequência de amostragem
$T_s$	Período de amostragem
$T$	Duração temporal de um sinal contínuo
$\mathbf{X}(:, k), \mathbf{X}(k, :)$	$\mathbf{X}(:, k)$ , coluna $k$ da matriz $\mathbf{X}$ ; $\mathbf{X}(k, :)$ , linha $k$ da matriz $\mathbf{X}$
$\mathbb{C}$	Conjunto dos números complexos
$\mathbb{H}$	Conjunto dos quaterniões
$\mathbb{N}^+$	Conjunto de números naturais não nulos
$\mathbb{R}^+$	Conjunto de números reais não nulos
$\mathbb{R}^{n \times m}$	Espaço euclidiano $nm$ -dimensional
$*$	Operador de convolução
$\otimes$	Produto de Hamilton
$\ \cdot\ $	Norma

## Análise em componentes principais

$\lambda_i$	Valor singular de ordem $i$
$a_{PC}$	Número de Componentes Principais utilizadas para o modelo PCA
$m$	Número de variáveis do processo

$op_{t_1, t_2}, pe_{t_1, t_2}$	Projeções dos dados operador e perito no espaço de pontuações $t_1, t_2$
$\Lambda$	Matriz diagonal de valores singulares decrescentes
$E$	Matriz residual associada ao método PCA
$P$	Matriz de carregamento
$S$	Matriz de covariância obtida a partir da matriz de dados $X$
$T$	Matriz de pontuações de fatores ( <i>scores</i> )
$V$	Matriz de vetores singulares
$X$	Matriz de dados
$\widehat{X}$	Matriz de dados $X$ estimada a partir do modelo PCA
$r(k)$	Vetor de sinais discretos de referência, no instante $k$
$r_x(k), r_y(k)$	Referências para os eixos das abcissas e das ordenadas, no instante $k$
$t_1, t_2$	Projeções no plano das Componentes Principais consideradas

### Análise de Fitts

$\delta$	Desvio do alvo
$A$	Distância ao alvo
$A_p$	Distância ao alvo para a tarefa Ponto-a-Ponto (PTP) $p$
$I_D$	Índice de dificuldade relativo ao movimento de aproximação ao alvo
$I_{PTP}$	Desempenho relativo à taxa de processamento de informação PTP
$J_{PTP}$	Índice de desempenho para tarefas Ponto-a-Ponto
$L$	Número total de alvos de um conjunto de tarefas Ponto-a-Ponto
$M_{PTP}$	Número total de falhas num conjunto de tarefas Ponto-a-Ponto
$M_T$	Tempo do movimento
$\widehat{M}_{Tp}$	Tempo estimado do movimento Ponto-a-Ponto para cada alvo $p$
$N_{PTP}$	Número total de tarefas Ponto-a-Ponto consecutivas
$\bar{S}_{PTP}$	Velocidade média de realização das tarefas Ponto-a-Ponto
$T_p$	Tempo de realização da tarefa Ponto-a-Ponto $p$
$T_m$	Limite de tempo para a tarefa Ponto-a-Ponto
$T_{PTP}$	Duração das tarefas Ponto-a-Ponto
$W$	Tolerância admissível da exatidão do alvo
$R^2$	Coefficiente de determinação da duração dos movimentos aos alvos

**Classificação de frequências**

$a$	Sinal de saída de um neurónio artificial genérico
$b$	Entrada de polaridade de um neurónio artificial genérico
$b_j$	Entrada de polaridade do neurónio artificial genérico $j$
$L_m$	Camada $m$ da rede neuronal
$l_r$	Taxa de aprendizagem
$p_i$	Entrada $i$ de um neurónio artificial genérico
$t_0$	Instante de tempo inicial
$E$	Número de neurónios de uma rede neuronal
$H_{LP}(s)$	Função de transferência do Filtro Passa-Baixo em tempo contínuo
$I_{w1,1}$	Pesos da primeira camada da estrutura neuronal associados à primeira entrada de atraso do primeiro neurónio
$I_{w1,2}$	Pesos da primeira camada da estrutura neuronal associados à segunda entrada de atraso do primeiro neurónio
$L_{w1,i}$	Pesos da primeira camada da estrutura neuronal associados à entrada de atraso $i$ do primeiro neurónio
$L_{w2,i}$	Pesos da segunda camada da estrutura neuronal associados à entrada de atraso $i$ do segundo neurónio
$M_{SE}$	Erro quadrático médio da Rede Neuronal Artificial, para um alvo de saída pretendido
$R$	Número total de entradas de um neurónio artificial genérico
$w_{1,i}$	Peso associado à entrada $i$ de um neurónio artificial genérico
$\mathbf{W}_{L_m, L_{m-1}}$	Matriz de pesos da camada $m$ de uma Rede Neuronal Artificial
$w_{L_m, L_{m-1} j, i}$	Peso da camada $m$ da rede neuronal, associado à entrada de atraso $i$ do neurónio artificial genérico $j$
$w_{E,R}$	Peso associado à entrada $R$ do neurónio artificial genérico $E$
$a_j(k)$	Sinal de saída $j$ da rede neuronal
$a_{L_1 1}(k) = u(k)$	Sinal de saída da primeira camada da rede neuronal
$a_{L_m j}(k)$	Sinal de saída do neurónio artificial genérico $j$ da camada $m$ da rede neuronal
$a(k), p(k)$	Sinais discretos de saída e de entrada da rede neuronal, no instante $k$
$f(n)$	Função de ativação de um neurónio artificial genérico

$n_1(k)$	Sinal discreto de entrada da função de ativação do primeiro neurónio artificial genérico, no instante $k$
$x_1(k)$	Saída que antecede a função de ativação do primeiro neurónio da segunda camada da estrutura neuronal, no instante $k$
$x_2(k)$	Saída que antecede a função de ativação do segundo neurónio da segunda camada da estrutura neuronal, no instante $k$
$\mathbf{a}_{L_m}(k)$	Vetor dos sinais de saída dos neurónios artificiais genéricos pertencentes à camada $m$ da rede neuronal, no instante $k$
$\mathbf{b}$	Vetor de entradas de polaridade, relativo ao algoritmo de aprendizagem de Widrow-Hoff
$\mathbf{g}$	Vetor de erro associado ao algoritmo de Widrow-Hoff
$\mathbf{p}$	Vetor das entradas de um neurónio artificial genérico
$\mathbf{w}$	Vetor dos pesos de um neurónio artificial genérico

### **Modelagem humano-máquina linear e controlo linear**

$\alpha_D$	Fator associado ao erro quadrático cartesiano médio
$\beta_D$	Fator associado à deformação quadrática média
$\gamma_D$	Fator associado à celeridade cartesiana
$\varphi_k$	Fase do sinal de resposta para a frequência angular de ordem $k$
$b_k$	Amplitude do sinal de resposta para a frequência angular de ordem $k$
$\vartheta$	Largura temporal do impulso aproximado à função delta de Dirac
$\rho$	Fator de compromisso entre o desempenho e o esforço de controlo
$\tau$	Atraso associado à operação humana
$\tau_N$	Componente singular do atraso da resposta de um piloto
$\zeta_N$	Fator de amortecimento do sistema neuromuscular humano
$\omega_c$	Frequência angular de cruzamento
$\omega_k$	Frequência angular de ordem $k$
$\omega_N$	Frequência natural de oscilação do sistema neuromuscular humano
$\Phi_M$	Margem de fase
$G_M$	Margem de ganho
$K_0$	Ganho estático
$K_d$	Ganho derivativo do controlador PID

$K_i$	Ganho integral do controlador PID
$K_p$	Ganho proporcional do controlador PID
$K_H$	Ganho associado ao comportamento do humano
$N_{PID}$	Coefficiente do filtro de <i>anti-aliasing</i> para a implementação do controlador PID em tempo discreto
$na$	Número de polos
$nb$	Número de zeros +1
$nd$	Atraso em número de amostras, inerente ao modelo ARX
$x_0, y_0$	Deslocamento do sinal de entrada e do sinal de saída
$v(t)$	Impulso aproximado à função delta de Dirac
$e(t)$	Sinal contínuo do erro de controle no instante $t$
$h(t)$	Resposta contínua ao impulso no instante $t$
$r(t)$	Sinal contínuo de referência no instante $t$
$x_k(t), y_k(t)$	Componentes na frequência angular de ordem $k$ dos sinais contínuos de entrada e de saída, no instante $t$
$y_{C_k}(t)$	Decomposição ímpar do sinal de saída para a frequência angular de ordem $k$
$y_{S_k}(t)$	Decomposição par do sinal de saída para a frequência angular de ordem $k$
$d_x(k), d_y(k)$	Deformações cartesianas do manipulador, no instante $k$
$e(k)$	Erro do modelo ARX no instante $k$
$x_x(k), x_y(k)$	Referências de seguimento no instante $k$ para o plano cartesiano
$y_x(k), y_y(k)$	Respostas de seguimento no instante $k$ para o plano cartesiano
$u_x, u_y$	Entradas de referência para os eixos das abcissas e das ordenadas
$-a_h$	Zero do sistema humano de primeira ordem
$-b_h$	Polo do sistema humano de primeira ordem
$d$	Escalar de transmissão direta, que representa a ação direta da entrada na saída
$p_{DF}$	Polo da função de transferência do compensador de Deslocamento de Fase
$q$	Operador atraso
$\bar{y}$	Valor médio do sinal contínuo de saída

$z_{DF}$	Zero da função de transferência do compensador de Deslocamento de Fase
$N$	Número total de observações num conjunto de dados
$N_n$	Covariância do ruído associado ao processo e à medida
$N_S$	Número de sinusoides de frequências múltiplas
$Q_n$	Covariância do ruído associado ao processo
$R_n$	Covariância do ruído associado à medida
$J(r(t))$	Crítério para o controlador Linear Quadrático ótimo
$J_p(u_p)$	Função de custo associada à aproximação de controlo ótimo dos pilotos
$B_{xx}(s), B_{yy}(s)$	Funções de transferência associadas ao modelo de incerteza, em tempo contínuo, para os eixos das abcissas e das ordenadas
$C_{1,...,3}(s)$	Funções de transferência de compensadores humano-máquina, em tempo contínuo
$C_{AF}(s)$	Função de transferência do compensador de avanço de fase, em tempo contínuo
$C_{DF}(s)$	Função de transferência do compensador de Deslocamento de Fase
$C_H(s)$	Função de transferência do compensador para o sistema humano-máquina, em tempo contínuo
$C_{Hxx}(s), C_{Hyy}(s)$	Funções de transferência dos compensadores humano-máquina, em tempo contínuo, para os eixos das abcissas e das ordenadas
$C_{LQG}(s)$	Função de transferência do controlador Linear Quadrático Gaussiano
$F_1(s)$	Função de transferência com termo adicional, do sistema humano-máquina multivariável, em tempo contínuo
$G_x(s), G_y(s), G_z(s)$	Funções de transferência em tempo contínuo da resposta de seguimento em anel fechado
$H(s)$	Função de transferência em tempo contínuo do sistema humano
$Q(s)$	Função de transferência que agrega o fator humano
$Q_1(s)$	Função de transferência com termo adicional, associada ao sistema humano-máquina univariável, em tempo contínuo
$J_x(s), J_y(s), J_z(s)$	Funções de transferência em tempo contínuo da entrada de referência tridimensional de seguimento

$M(s)$	Função de transferência do modelo associado à máquina
$Q_{SA}(s)$	Função de transferência do modelo ARX em tempo contínuo, sem o atraso
$M_{xx}(s), M_{yy}(s), M_{zz}(s)$	Funções de transferência do sistema humano-máquina em tempo contínuo, para os eixos cartesianos
$P(s)$	Função de transferência do processo $P$ , em tempo contínuo
$P_{xx}(s), P_{yy}(s)$	Funções de transferência associadas à dinâmica do processo em tempo contínuo, para os eixos das abcissas e das ordenadas
$R(s)$	Transformada de Laplace da entrada $r(t)$
$Y(s)$	Transformada de Laplace da saída $y(t)$
$Q_{ARX}(s)$	Função de transferência do modelo ARX, com o atraso
$A$	Matriz de dinâmica
$B$	Matriz de entrada
$C$	Matriz de saída
$K$	Matriz de ganho ótimo
$M(s)$	Matriz de transferência do modelo humano-máquina multivariável para o espaço cartesiano $p$ -dimensional
$P(s)$	Matriz de transferência do processo multivariável para o espaço cartesiano $p$ -dimensional
$Q_p$	Matriz de ponderações das saídas do modelo interno do piloto
$R_p$	Matriz de ponderações da ação de controlo do piloto
$S_p$	Matriz de ponderações associada à velocidade da resposta de controlo do piloto
$M_{QD}$	Deformação quadrática média
$M_{QE}$	Erro quadrático cartesiano médio
$M_{QEPCA}$	Índice de desempenho PCA
$T_{MD}$	Celeridade cartesiana
$T_I$	Constante de tempo associada ao desfasamento
$T_L$	Constante de tempo associada ao tempo de processamento humano
$T_N$	Constante de tempo do sistema neuromuscular humano
$T_{ms}$	Índice de desempenho associado à tarefa de seguimento
$T_{rem}$	Termo remanescente do modelo quase-linear de McRuer et al.

$T_e$	Tempo de duração da experiência
$\mathbf{a}_{\text{ARX}}$	Vetor de estimação de parâmetros ARX associado às saídas
$\mathbf{b}_{\text{ARX}}$	Vetor de estimação de parâmetros ARX associado às entradas
$\mathbf{d}(k)$	Vetor de coordenadas reais no plano cartesiano, associado à deformação do manípulo
$\mathbf{x}(k), \mathbf{y}(k)$	Vetores de coordenadas reais da referência e da resposta 2D
$\mathbf{u}$	Sinais de entrada, na forma de vetor coluna
$\mathbf{u}_p$	Vetor da ação de controle do piloto
$\mathbf{y}_p$	Vetor de saídas do modelo interno do piloto

### Tecnologia assistiva

$\alpha$	Parâmetro de aleatoriedade associado ao Algoritmo dos Pirilampos
$\alpha_F, \gamma_F$	Parâmetros de projeto, relativos à taxa de sucesso das tarefas
$\beta, \beta_0$	Atratividade do pirilampo e atratividade à distância zero
$\beta_F$	Parâmetro de projeto associado à função de custo $J_c(k, n_{\text{tar}})$
$\delta_c(t)$	Sinal de comutação para visualização da “intenção”
$\phi$	Ângulo de rotação em torno do eixo longitudinal ( <i>roll</i> )
$\theta$	Ângulo de inclinação longitudinal ( <i>pitch</i> )
$\psi$	Ângulo de rotação em torno do eixo vertical ( <i>yaw</i> )
$\gamma$	Coefficiente de absorção luminosa do Algoritmo dos Pirilampos
$\nu$	Coefficiente de redução da aleatoriedade
$\sigma_c(t)$	Sinal de comutação para introdução do controlador
$\epsilon_i$	Vetor de números aleatórios com distribuição uniforme, utilizado na movimentação de atração de um pirilampo $i$
$\Delta TH I_A$	Duração ideal da sequência PTP, com a distância constante $A$ ao alvo
$\Delta T_{\text{HO}}$	Duração ideal da escrita com o teclado virtual
$\Delta T_{\text{VK}}$	Duração da escrita em mãos livres no teclado virtual
$\psi(n_{\text{tar}})$	Termo associado à taxa de sucesso das tarefas
$\xi$	Vetor dos parâmetros de otimização do sistema humano-máquina
$\xi^*$	Vetor obtido dos parâmetros de otimização do sistema humano-máquina, após um processo de adaptação baseado em conhecimento



$E_x(k), E_y(k)$	Erros de controlo em $x$ e em $y$ , associados à posição do cursor, para a amostra $k$
$I_0$	Intensidade luminosa original
$I(r)$	Intensidade luminosa
$L_{HCR}(s)$	Função de transferência do sistema de controlo em anel fechado com o protótipo, para cada eixo
$J_c(k, n_{tar})$	Função de custo para a amostra $k$ , decorrida a tarefa $n_{tar}$
$K_{ph}, K_{dh}$	Ganhos proporcional e derivativo do controlador do cérebro humano
$M(n_{tar})$	Número acumulado de tarefas não cumpridas
$M_G, M_R,$	Matrizes de rotação
$K_{PID}$	Matriz de valores dos parâmetros dos controladores PID do protótipo
$MSE_X, MSE_Y$	Erros quadráticos médios do erro de controlo para os eixos X e Y
$MSE_x(k), MSE_y(k)$	Erros quadráticos médios para uma janela deslizando
$P_{in}$	Índice de desempenho associado à tarefa de interação facial
$T_i$	Constante de tempo do termo integral do controlador PID
$T_d$	Constante de tempo do termo derivativo do controlador PID
$T_{p1}, T_{p2}, T_z$	Parâmetros do modelo em anel fechado do humano e do módulo HID
$iter$	Número da iteração do Algoritmo dos Pirilampus
$T_t$	Constante de tempo do método de compensação de <i>anti-windup</i>
$n_{tar}$	Tarefa $n$
$m_0$	Parâmetro proporcional ao módulo da velocidade do cursor
$n_{x,y}(k), p_{x,y}(k)$	Vetores de coordenadas da “intenção” e do cursor, para a amostra $k$
$q$	Quaternião de Hamilton
$q^*$	Conjugado do quaternião $q$
$q_d$	Vetor relativo ao desempenho do sistema humano-máquina
$t_{x,y}(k)$	Vetor de coordenadas do alvo, para a amostra $k$
$u_d$	Vetor tridimensional de direção
$v_{cur}$	Vetor da velocidade normalizada do cursor do computador
$v_{horiz}$	Velocidade horizontal normalizada do cursor do computador
$v_{vert}$	Velocidade vertical normalizada do cursor do computador
$w_d$	Duração em amostras da janela deslizando
$x_{max} \times y_{max}$	Resolução em <i>pixels</i> do ecrã

**Transferência de aprendizagem/conhecimento**

$\alpha_L$	Fator associado à diferença entre a duração média das voltas face à duração temporal ideal
$\beta_L$	Fator associado ao desvio padrão da duração temporal das voltas no simulador de condução
$\gamma_L$	Fator associado ao quociente médio entre o movimento absoluto total do volante, travão e acelerador, e a duração da volta
$\delta_V$	Fator relativo à média da posição absoluta do volante
$\varepsilon$	Critério de terminação do Algoritmo Difuso de $c$ -Médias
$\phi_{sat_b}$	Ângulo de saturação de viragem do volante
$\phi_V$	Ângulo de viragem do volante
$\varsigma$	Limite para a condição de transferência de conhecimento
$\mu(PA_V)$	Posição absoluta média do volante
$\mu(T_L)$	Média da duração das voltas
$\sigma(PA_V)$	Desvio padrão da posição absoluta do volante
$\sigma(T_L)$	Desvio padrão da duração das voltas
$C$	Número de agrupamentos ( <i>clusters</i> )
$C_{PID}(s)$	Função de transferência do controlador PID em tempo contínuo
$C_{PID}(z)$	Função de transferência do controlador PID em tempo discreto
$I_{PC}$	Índice de desempenho para as tarefas de condução
$J_{FCM}$	Função de custo do Algoritmo Difuso de $c$ -Médias (FCM)
$K_{p_i}$	Ganho proporcional do controlador PID para o estado de condução $i$
$P_V$	Posição normalizada do volante
$R_{max}$	Valor máximo da matriz residual $R_W$
$R_{min}$	Valor mínimo da matriz residual $R_W$
$R_{sum}$	Soma de todos os elementos da matriz residual $R_W$
$R_{val}$	Valor utilizado para a condição de transferência de aprendizagem
$T_{ID}$	Duração ideal da volta
$T_{VO}$	Duração da volta
$c_i$	Centroide do agrupamento $i$
$d(z_k, c_i)$	Distância entre o centroide do agrupamento $i$ e a amostra $k$
$r_{ij}$	Distância cartesiana entre os pirilampos $i$ e $j$ .

$u_{ik}$	Grau de pertença da amostra $k$ ao agrupamento $i$
$M_{LA}$	Média do quociente entre o valor total absoluto dos movimentos do volante, travão e acelerador, e a duração de cada volta
$M_{VTA}$	Valor total absoluto dos movimentos do volante, do travão e do acelerador
$S_{LA}$	Desvio padrão do quociente entre o valor total absoluto dos movimentos do volante, travão e acelerador, e a duração de cada volta
$l$	Contador de ciclo para a minimização da função de custo $J_{FCM}$
$q_{FCM}$	Expoente de ponderação relativo ao Algoritmo Difuso de $c$ -Médias
$R_U$	Matriz de coeficientes de correlação para o operador U
$R_V$	Matriz de coeficientes de correlação para o operador V
$R_W$	Matriz residual, associada ao método de transferência de aprendizagem
$U$	Matriz de agrupamento difuso
$Z$	Conjunto de $N$ amostras de dados

Página em branco

# Capítulo 1

## Introdução

*Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva para com toda a humanidade.*

Marie Curie (1867 - 1934)

### Sumário

1.1	Enquadramento e motivação . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	6
1.3	Contribuições originais . . . . .	8
1.4	Estrutura da dissertação . . . . .	12

### Resumo

Neste capítulo é exposto o enquadramento e o tema deste trabalho, as motivações, os objetivos e as contribuições originais da investigação desenvolvida. Apresenta-se ainda a organização geral da dissertação e as convenções utilizadas.

### 1.1 Enquadramento e motivação

A integração humano-máquina constitui uma abordagem científica que reúne diferentes áreas do conhecimento, nem sempre associadas. Neste âmbito surge a estratégia da engenharia associada aos aspetos comportamentais. Após a 2ª Guerra Mundial, durante a qual se evidenciou a discrepância entre a utilização dos aviões e a inserção desadaptada dos pilotos, surgiu a estratégia da Psicoengenharia, com vista a conceber os mecanismos da tecnologia de acordo com o comportamento humano, e não ao contrário, como era tradição, bem expressa pelo personagem Charlot de Charlie Chaplin, no filme *Tempos Modernos*. Assim, toda a segunda metade do século XX viu surgir inúmeras contribuições de investigação associadas ao paradigma da integração da inteligência humana e da inteligência maquínica <sup>1</sup>, nomeadamente sobre teoria do controlo, sistémica, fatores

<sup>1</sup> De acordo com Duarte-Ramos (2002), «A inteligência humana cria o que chamamos inteligência tecnológica. (...) Ser inteligente ou ser intelegente, eis a questão. Vê-se a diferença essencial destas ideias comparando a conceção psicológica da inteligência humana e a sua emulação pelos métodos da inteligência artificial das máquinas.».

humanos, computação natural, entre outras.

O projeto de dispositivos orientados para o ser humano constitui atualmente uma área de investigação com elevado interesse. Num processo envolvendo o ser humano, o operador controla a máquina através da execução de diversas tarefas motoras. Durante essa atividade o operador estará em processo de aprendizagem, pelo que, o seu desempenho, deverá aumentar progressivamente. Torna-se então evidente a necessidade de se poderem desenvolver equipamentos orientados para os seres humanos. Estes dispositivos devem ser capazes de se adaptar aos seus utilizadores, funcionando com base na informação ou na estimativa do desempenho. Os contributos resultantes desta área de investigação podem ser aplicados em muitas atividades, onde o fator humano desempenha atualmente um papel importante. Exemplos de tais aplicações podem ser encontrados nos dispositivos para tecnologia assistiva e Cirurgia Minimamente Invasiva (MIS), nos Sistemas Inteligentes de Treino (ICSs) e nos Sistemas de Assistência ao Condutor (DASs).

A integração humano-máquina encontra-se hoje em dia muito ligada à integração humano-computador, dada a importância atual das tecnologias da informação. Na figura 1.1 e na tabela 1.1 são apresentados exemplos de Interfaces Humano-Computador (HCIs), e respetivas aplicações.

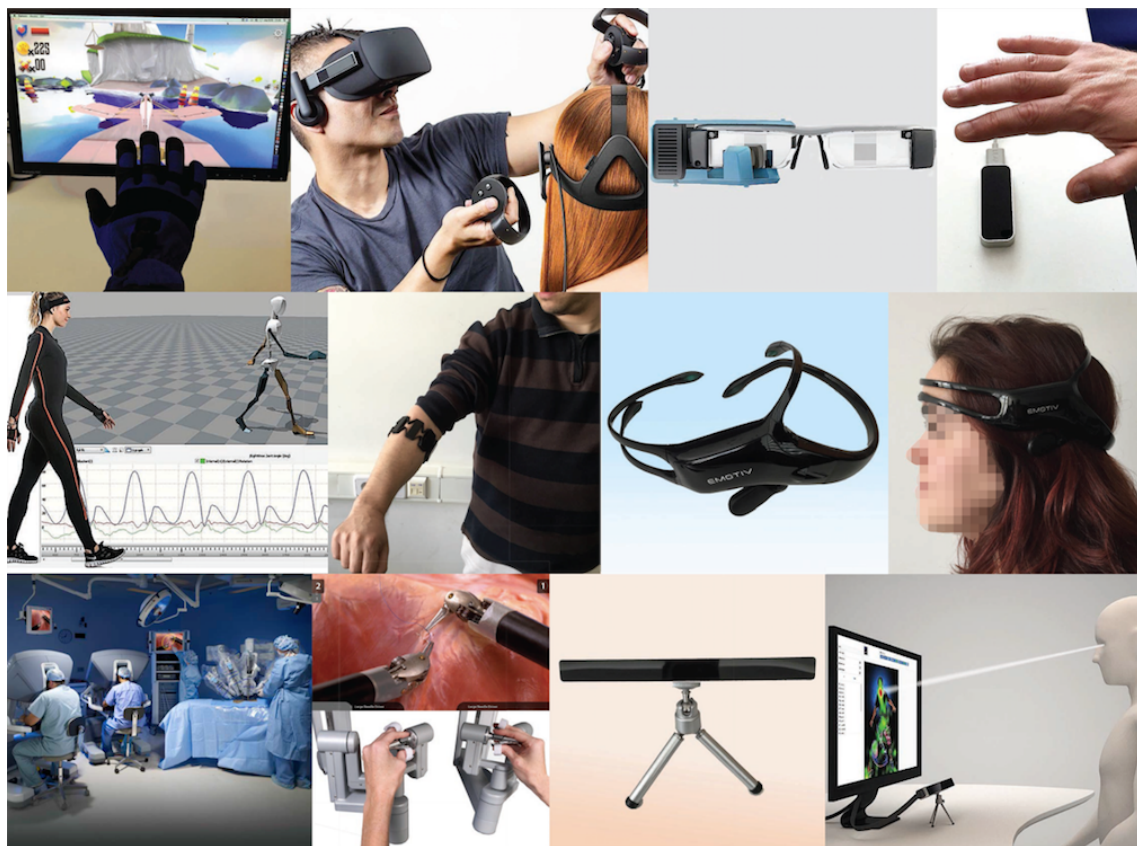


Figura 1.1: “Mosaico” com imagens de HCIs. Do topo-esquerda à base-direita: interface através de luva háptica, Oculus Rift™ (<http://www.anandtech.com/show/9921/>) (Shilov, 2016), sistema de comunicação através do olhar EyeSpeak™ (<http://www.myeeyespeak.com/>) (LusoVU, 2015), Leap Motion™ Controller, sistema de captura do movimento humano Xsens MVN™ BIOMECH (<https://www.xsens.com/products/mvn-biomech/>) (Xsens™, 2017), bracelete Myo™ para controlo remoto gestual, Interface Cérebro-Computador (BCI) Emotiv Insight Brainwear® EEG, sistema cirúrgico da Vinci™ (©2017 Intuitive Surgical, Inc.), Eye-gaze Response Interface Computer Aid (<http://www.theeyetribe.com>) (EyeTribe, 2014).

Tabela 1.1: Exemplos de Interfaces Humano-Computador.

Interface	Principal aplicação
Interação Facial Humano-Computador (FHCI)	Tecnologia assistiva
Sistema de comunicação através do olhar EyeSpeak™ (LusoVU)	Tecnologia assistiva
Eye-gaze Response Interface Computer Aid (ERICA)	Tecnologia assistiva
PT Magic Eye	Tecnologia assistiva
Interface sip-and-puff	Tecnologia assistiva
Rato de bandolete Quha Zono™	Tecnologia assistiva
Rato FLipMouse, com interação através da boca	Tecnologia assistiva
Rato sem fios Tracker Pro, para acesso AAC	Tecnologia assistiva
Teclado Braille tomador de notas HIMS Braille Sense U2™ H432B	Tecnologia assistiva
OrCam MyEye 2.0	Tecnologia assistiva
Leap Motion™ Controller	Acesso gestual
Bracelete Myo™ Gesture Control	Acesso gestual
Anel SmartRing com display OLED	Acesso gestual
Apresentador sem fios Logitech Spotlight™	Acesso gestual
Óculos de seguimento ocular Tobii Pro™ 2	Acesso pelo olhar
Interface Cérebro-Computador (BCI) Emotiv Insight Brainwear® Wireless EEG	Acesso pela mente
EyeTribe (Oculus™) VR Eye Tracking, com representação e navegação foveal	Realidade Virtual
Computador holográfico Microsoft HoloLens™	Realidade Virtual
Sistema de Realidade Virtual (VR) Oculus Rift™	Realidade Virtual
Computador móvel holográfico HOLO 2.0 com Extensão de Efeitos (EFX)	Realidade Virtual
Google Glass™ Optical Head-Mounted Display (OHMD)	Realidade Aumentada
Interface Magic Leap™ One	Realidade Aumentada
Rato 3D SpaceNavigator™	Interatividade
Pen tablet Wacom® Bamboo™	Interatividade
Câmara de profundidade SoftKinetic™ DepthSense DS325 ToF 3D	Mapeamento
Kinect™ para Microsoft Xbox™	Entretenimento
Controlador Wii™	Entretenimento
PlayStation® VR	Entretenimento
Gamepad sem fios MOGA™, para iOS ou Android	Entretenimento
Xsens™ Human Motion Measurement	Desporto
Monitor de atividade Lumo Lift™	Desporto
Interface para mão biónica i-limb™ ultra, da Touch Bionics™	Biónica
Sistema cirúrgico da Vinci™	Laparoscopia

Este trabalho pretende dar um contributo inovador neste esforço de integração humano-máquina, propondo e validando um conjunto de teorias, metodologias e técnicas, que potenciem a melhoria do desempenho.

O projeto de controlo em sistemas de interação humano-máquina constitui presentemente um tema de renovado interesse. Acresce o facto de cada vez mais surgirem novos dispositivos e interfaces (figura 1.1), que têm contribuído para a melhoria do modo de vida. As máquinas tradicionais não são normalmente capazes de se adaptarem aos seus utilizadores, requerendo implicitamente

uma adaptação e aprendizagem humana. Surge assim a necessidade de melhorar a interação entre o operador e a máquina, tendo como fim o aumento da produtividade, da exatidão, da segurança e do conforto. Estudos recentes (Ovaskainen et al., 2004; Tervo & Koivo, 2010) revelaram para um dado processo produtivo que a diferença de produtividade entre operadores, trabalhando sob condições idênticas, chega a ser superior a 40 %, o que vem demonstrar a importância <sup>2</sup> desta temática.

### 1.1.1 Questões de investigação

Nesta subsecção é apresentada uma visão geral do problema principal de que trata a presente dissertação. Com este trabalho de pesquisa tenta dar-se contributos científicos e tecnológicos originais, sustentados em diversas soluções de modelagem, de identificação e de projeto de controlo, empregues para a melhoria do desempenho dos sistemas de interação humano-máquina. Estas soluções são validadas através de uma análise quantitativa dos resultados experimentais, suportada em índices de desempenho.

#### **Principal questão de investigação.**

*O desempenho de um sistema que integra o ser humano pode ser melhorado, se for utilizado um controlador de assistência que tenha em conta o comportamento e as limitações do operador humano e da máquina?*

As subquestões de investigação seguintes sintetizam o objetivo principal deste trabalho:

**Questão de investigação 1:** *Que métodos podem ser utilizados para caracterizar e identificar um sistema de interação com o ser humano?*

**Questão de investigação 2:** *Como quantificar o desempenho de um dado sistema humano-máquina?*

**Questão de investigação 3:** *Quais serão as metodologias adequadas de projeto de controlo, para a melhoria do desempenho de um sistema de interação humano-máquina?*

São formuladas três hipóteses (Vaishnavi & Kuechler, 2015), tendo como base as três subquestões de investigação que são identificadas neste trabalho. Cada uma das hipóteses vai no sentido de providenciar uma proposta de possível solução para cada subquestão de investigação apresentada.

### 1.1.2 Hipóteses

O objetivo principal da identificação dos sistemas humano-máquina não é o de replicar completamente o seu comportamento, mas antes poder capturar a informação necessária para compensar as limitações das dinâmicas que integram a sistémica que agrega o operador humano e a máquina ou

---

<sup>2</sup> Do paradigma da integração humano-máquina resulta evidente que não devem ser os seres humanos a adaptarem-se às máquinas, mas sim as máquinas a adaptarem-se aos seres humanos (Suzuki, 2010).



o equipamento<sup>3</sup>. É assim proposto um conjunto de soluções inovadoras, que advém da formulação das hipóteses de investigação<sup>4</sup>:

**Hipótese 1:** Se forem realizadas tarefas de seguimento, então a modelagem linear é um método exequível para o projeto de sistemas de controlo de assistência ao operador.

**Hipótese 2:** Se os operadores estiverem treinados, então a análise de Fitts e a Análise em Componentes Principais constituem metodologias válidas para a quantificação do desempenho do sistema humano-máquina.

**Hipótese 3:** Se existir um grau significativo de correlação entre o comportamento dos operadores humanos, então a transferência de aprendizagem é uma técnica alternativa para a síntese operativa de sistemas de controlo de assistência.

### 1.1.3 Método de investigação adotado

Neste trabalho recorre-se, de uma forma geral, ao método tradicional de investigação, cujas etapas principais são apresentadas na figura 1.2. A realização, por tentativas, de cada etapa será o resultado de um processo iterativo, envolvendo pesquisa, experimentação, validação de resultados e espírito crítico.

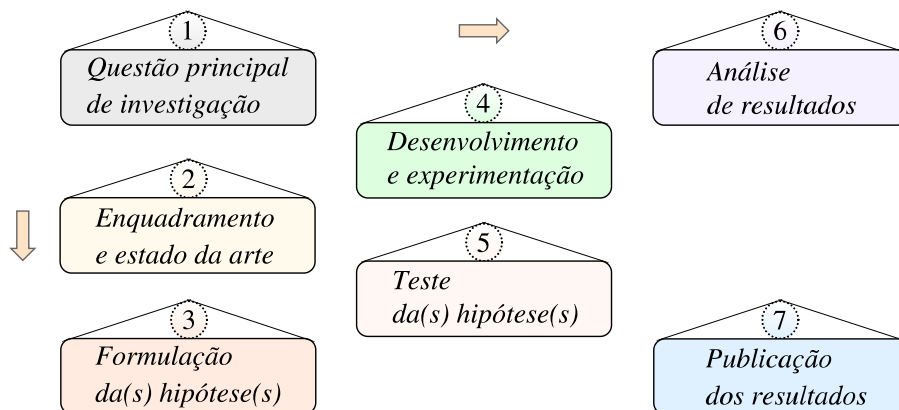


Figura 1.2: Principais etapas do método tradicional de investigação.

As hipóteses de investigação identificadas neste trabalho são validadas através do desenvolvimento de técnicas de modelagem, de identificação e de metodologias de controlo e de projeto aplicadas para diversos sistemas de interação humano-máquina. Estes métodos são implementados tendo em conta a adequabilidade das interfaces<sup>5</sup> aos seus utilizadores humanos. Recorre-se, regra geral, ao seguimento manual e às tarefas Ponto-a-Ponto (PTP).

<sup>3</sup> A identificação de sistemas humano-máquina revela-se tarefa de elevada complexidade, dada a imprevisibilidade associada à natureza humana.

<sup>4</sup> As hipóteses formuladas vão sendo validadas ao longo do trabalho de investigação.

<sup>5</sup> São utilizadas as seguintes interfaces: manípulo (*joystick*); *pen tablet*; *webcam*; volante; pedais e ainda um protótipo desenvolvido neste trabalho para o acesso ao computador. Algumas das plataformas de teste desenvolvidas podem possibilitar compatibilidade adicional com as interfaces luva háptica, bracelete Myo™ (Gaetani et al., 2018) e Leap Motion™ Controller (Ponraj & Ren, 2018).

As soluções das questões de investigação comportam quatro componentes que são descritas ao longo da dissertação, designadamente:

- Modelagem de sistemas humano-máquina.
- Métodos de identificação de sistemas humano-máquina.
- Metodologias de projeto de controlo para a melhoria do desempenho humano-máquina.
- Dispositivos de *hardware* e ferramentas de *software*.

A relevância teórica e prática é sustentada pela análise das contribuições obtidas em diversas áreas que constituem o corpo do conhecimento teórico associado a este trabalho <sup>6</sup>, nomeadamente a sistémica, o controlo, a eletrónica, os fatores humanos e as ciências da cognição, entre outras. As contribuições são também validadas pela comunidade científica através de diversas publicações em revistas, capítulos de livros e conferências, conforme a lista de publicações (apêndice C).

Para a análise e a validação dos resultados associados ao desempenho dos sistemas humano-máquina são construídas plataformas de teste, recorrendo-se a várias interfaces e ferramentas de *software* e a diverso *hardware*. As plataformas desenvolvidas para as experiências com as Interfaces Humano-Máquina incluem Sistemas de Aquisição de Dados (DAQs), dispondo ainda algumas de telemetria. A recolha dos dados experimentais teve, como pressuposto, o consentimento prévio dos participantes nas experiências realizadas <sup>7</sup>. A implementação e o teste dos controladores dos sistemas humano-máquina recorre, ao nível do *software*, a várias aplicações desenvolvidas neste trabalho em ambientes LabVIEW®, MATLAB®/Simulink®, ARDUINO® IDE, Processing e Visual Studio®, e ao nível do *hardware* a sistemas embutidos projetados, de modo a permitir que as estratégias de assistência e os métodos de controlo propostos possam ser integrados em situações reais concretas. No projeto de sistemas de controlo para tecnologia assistiva é desenvolvido um protótipo inovador <sup>8</sup> de *hardware/software*, destinado ao acesso ao computador, que consiste num Dispositivo de Interface Humana (HID) e numa aplicação de *software* dedicada. A validação experimental do protótipo é realizada por pessoas sem e com necessidades especiais.

## 1.2 Objetivos

O projeto de dispositivos humano-máquina encontra-se tradicionalmente mais focado na ergonomia, negligenciando-se frequentemente os aspetos ligados à forma como os humanos aprendem

---

<sup>6</sup> No capítulo 2 são apresentadas referências do estado da arte dos sistemas com adaptação ao humano.

<sup>7</sup> Nas experiências empreendidas foram acumulados um total de dados superior a 1 GB. As experiências com e sem controlador foram realizadas após treino prévio, de modo a atenuar a evolução do desempenho durante as tarefas. Foi também assegurado um descanso mínimo de tempo entre a execução das tarefas, para evitar o cansaço. O tratamento dos dados experimentais e a implementação dos diversos sistemas de assistência humano-máquina desenvolvidos, implicou a escrita e a programação de mais de 30000 linhas de código.

<sup>8</sup> De acordo com March & Smith (1995), «(...) são necessárias atividades de ciência de projeto e de ciência natural para assegurar que a pesquisa em Tecnologia da Informação (IT) é ao mesmo tempo relevante e eficaz.».

e utilizam as máquinas. Um dos principais motivos para esta situação prende-se com o facto de geralmente as máquinas não se alterarem, independentemente do desempenho e da destreza do seu utilizador humano, requerendo frequentemente um elevado tempo para o treino do operador.

Este trabalho de investigação tem como principais objetivos o estudo e o desenvolvimento das técnicas de modelagem dos sistemas humano-máquina, bem como das metodologias de controlo e de projeto de controladores eletrónicos, que permitam a adaptação das interfaces e das máquinas aos humanos, integrando estratégias de adaptacia e simplicidade <sup>9</sup> aos ambientes de elevada complexidade que caracterizam a realidade humano-máquina (Duarte-Ramos, 2014). Pretende-se ainda, com base nas técnicas de controlo desenvolvidas e validadas, atingir a melhoria global do desempenho dos diversos sistemas com o utilizador Humano Integrado no Anel de controlo, assim como reduzir o esforço de operação associado às tarefas e os tempos de aprendizagem.

De uma perspetiva tecnológica pretende-se desenvolver dispositivos e sistemas eletrónicos de controlo capazes de se adaptar ao nível de desempenho dos operadores humanos que os utilizam, não tomando apenas em conta os aspetos ergonómicos associados à operação mas, e fundamentalmente, considerando o modo como os seres humanos aprendem e utilizam as máquinas. Para tal torna-se necessária a integração dos fatores humanos associados ao controlo manual (figura 1.3.a). As aplicações de controlo clássicas envolvendo controlo automático (figura 1.3.b) frequentemente desconsideram o elemento humano, como fazendo parte do anel resultante de controlo do sistema. O projeto de sistemas de controlo com o Humano Integrado no Anel (HuIL) (figura 1.3.c) resulta assim numa abordagem de partida para poder integrar os fatores humanos à panóplia dos elementos elétricos e mecânicos que envolvem um sistema humano-máquina.

Do ponto de vista científico, são objetivos principais neste trabalho:

- Estudar os vários formalismos, métodos, técnicas e aplicações que interessam ao conhecimento dos sistemas de interação humano-máquina, sobretudo na sua componente eletrónica.
- Desenvolver trabalho fundamental de descrição dos comportamentos dinâmicos pelo modelo sistémico, que tenha em vista a adaptação do controlador eletrónico às limitações humanas.
- Criar modelos integrados que otimizem a reação inteligente com a predição inteligente em sistemas de controlo inteligente-intelegente.
- Validar experimentalmente, por modelação e simulação, esses modelos de controlo dos sistemas integrados humano-máquina.
- Considera-se que sejam possíveis múltiplas aplicações alvo deste trabalho, nas quais participam mecanismos automáticos com intervenção humana, desde a regulação manual ao seguimento crítico através de sistemas eletrónicos.

---

<sup>9</sup> Os modelos humano-máquina revelam-se importantes para o desenvolvimento de dispositivos e sistemas de apoio ao operador. Estes modelos fornecem normalmente informação suficiente para o projeto de sistemas de controlo com adaptação ao operador humano.

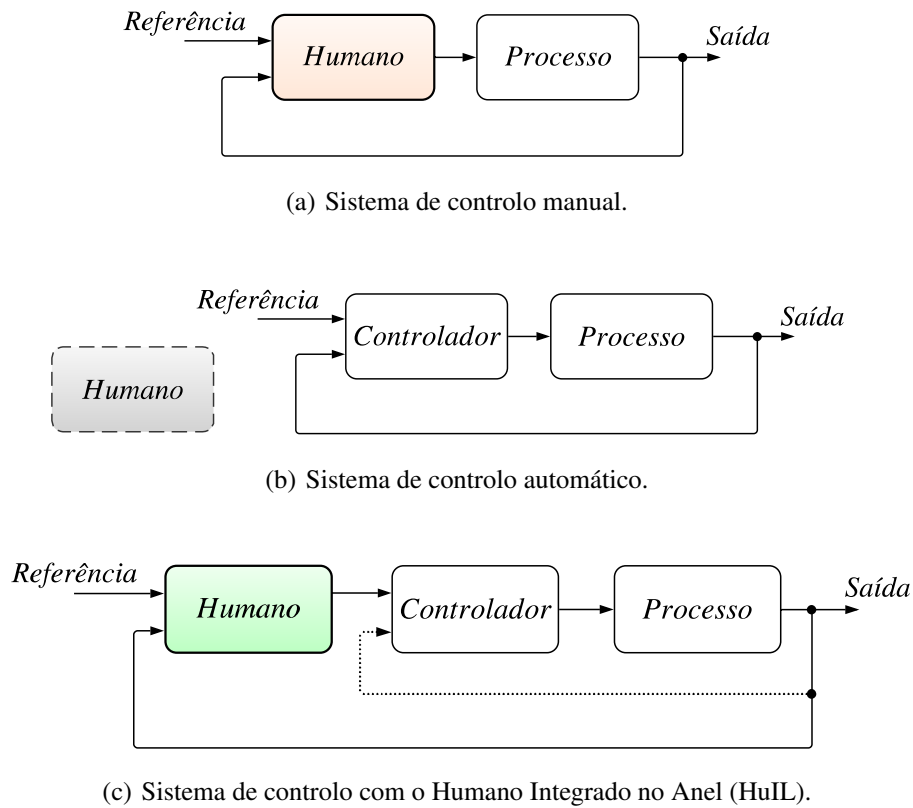


Figura 1.3: Diferentes abordagens de controlo em sistemas humano-máquina.

De modo a providenciar a ênfase devida às potencialidades dos sistemas de interação e de controlo adaptados aos humanos, são ainda consideradas áreas de aplicação que melhorem a qualidade de vida, como por exemplo os Sistemas de Assistência ao Condutor, ou as tecnologias assistivas, empregues para os utilizadores em geral, e também para o apoio a pessoas com limitações motoras e necessidades especiais.

### 1.3 Contribuições originais

A dissertação apresenta diversas contribuições originais, nomeadamente na vertente do projeto de controlo em sistemas que integram o fator humano, potenciando um apoio efetivo aos utilizadores dos sistemas com interação humano-máquina.

A primeira contribuição original surge no capítulo 3 (subsecção 3.3.5) e no capítulo 4 (subsecção 4.4.2), e diz respeito ao desenvolvimento de uma metodologia simplificada de modelagem e controlo, com vista à síntese de um controlador que potencie uma melhoria efetiva do desempenho e da destreza do operador em ambientes de interação humano-máquina multidimensionais. Esta metodologia resulta da combinação de técnicas de espaço de estados e de análise em frequência, numa abordagem de controlo ótimo. Os resultados experimentais obtidos com esta metodologia são descritos no capítulo 4 (subsecção 4.4.2), possibilitando a melhoria do desempenho em tarefas de seguimento manual num processo instável, e como tal, de dificuldade acrescida para o operador.

Para os sistemas de interação humano-máquina que dependem exclusivamente da informação visual do operador humano, integrado no anel de controlo, é proposta a segunda contribuição desta dissertação, consistindo numa metodologia de transferência de aprendizagem entre operadores, para o projeto de controladores eletrónicos de assistência ao operador. A transferência de conhecimento ou de aprendizagem é a área que estuda o problema de adquirir o conhecimento na resolução de uma situação, aplicando-o em outra situação relacionada. Outra interpretação para transferência de aprendizagem poderá ser a que um operador individual pode aprender diretamente a partir de outro operador correlacionado. É assim introduzida uma condição de transferência de conhecimento entre operadores, baseada na análise de correlação. A inclusão do controlador de assistência baseado em transferência de aprendizagem levou à melhoria do desempenho para os operadores humanos com comportamentos correlacionados. Esta contribuição é descrita em detalhe no capítulo 3 (subsecção 3.4.4), sendo a validação dos resultados experimentais (capítulo 4, secção 4.5) realizada numa plataforma de condução desenvolvida para o efeito.

A terceira contribuição original, apresentada no capítulo 4 (secção 4.6), é relativa ao projeto e à síntese operativa de sistemas de controlo para tecnologia assistiva. Propõe-se uma arquitetura baseada num esquema de controlo em cascata que recorre à “intenção” do operador humano. Esta técnica permitiu a melhoria do desempenho do operador, da usabilidade e dos tempos de resposta envolvidos na movimentação e atuação do cursor do computador, conforme evidenciam os resultados experimentais respetivos no capítulo 4 (subsubsecções 4.6.1.3 e 4.6.2.6). A arquitetura de controlo pode ser aplicada e estendida a diversas Interfaces Humano-Computador (HCIs). Foi ainda possibilitada a comunicação sem fios e a telemetria. Na segunda e na terceira contribuições, as metodologias de filtragem de Kalman e os algoritmos de controlo além de serem desenvolvidos em *software*, foram também implementados em *hardware* (capítulo 3, subsecções 3.4.2, 3.4.4 e 3.4.6, e capítulo 4, secções 4.5 e 4.6), permitindo a execução em Tempo-Real (RT).

Salienta-se no âmbito deste trabalho, como a quarta contribuição original, o desenvolvimento de um protótipo de *hardware/software* para tecnologia assistiva, destinado a permitir o acesso ao computador por USB ou *Bluetooth*<sup>®</sup> (BT), a pessoas com necessidades especiais. Este dispositivo de Interface Humano-Máquina (HMI) (figura 1.4) possibilita a assistência e a interação humano-computador, sendo a sua utilização alternativa ao rato, teclado e *gamepad/joystick*. O campo de aplicação do dispositivo desenvolvido abrange a assistência para limitações motoras e sensoriais que resultem da tetraplegia, das deformidades congénitas do membro superior, da Esclerose Múltipla (EM), da paralisia cerebral, do traumatismo crânio-encefálico, das lesões vértebro-medulares, da distrofia muscular, da Esclerose Lateral Amiotrófica (ELA), da Síndrome do Túnel do Carpo (STC) ou da Síndrome de Rett (RTT), onde um utilizador possui reduzido ou nenhum controlo das suas mãos, encontrando-se normalmente impossibilitado de poder utilizar uma Interface Humano-Computador comum.

Do Dispositivo de Interface Humana (HID) de colocação corporal concebido <sup>10</sup> (figura 1.4), que apresenta duas configurações possíveis com dimensões de  $42 \times 21 \times 9$  mm e de  $42 \times 21 \times 7$  mm, realça-se a qualidade da solução encontrada para a implementação da interface desenvolvida, que

---

<sup>10</sup> Para a sua construção mecânica DIY em material PLA recorreu-se à impressão 3D através de Fabrico de Filamento Fundido (FFF).



(a) Dispositivo eletrónico desenvolvido de acesso ao computador a pessoas com necessidades especiais, com apoio de colocação na cabeça.



(b) Dispositivo eletrónico desenvolvido em modo de utilização como Sistema de Referência de Atitude e Rumo (AHRS).

Figura 1.4: Configurações do Dispositivo de Interface Humana desenvolvido.

pode ser colocada em diferentes partes do corpo humano <sup>11</sup> e que recorre a um microcontrolador ARM® com arquitetura RISC e a diversos Sistemas Microeletromecânicos (MEMSs), designadamente Unidade de Medição Inercial (IMU), com giroscópio, acelerómetro e sensor de temperatura, compasso eletrónico (magnetómetro), altímetro <sup>12</sup> e contacto de pressão. Esta contribuição é descrita no capítulo 4 (secção 4.6 e subsecção 4.6.2). Para o desenvolvimento do protótipo proposto para o acesso ao computador foi também criada em linguagem de programação C#, uma aplicação de *software* <sup>13</sup> (figura 1.5), que possibilita a comunicação com o Dispositivo de Interface Humana colocado no utilizador humano, permitindo deste modo o acesso em Tempo-Real a diversas funcionalidades <sup>14</sup> alternativas à utilização do rato, do teclado virtual e do *gamepad/joystick*, através dos movimentos do utilizador detetados pelo Dispositivo de Interface Humana (figura 1.4). A aplicação de *software* <sup>15</sup> encontra-se descrita em detalhe no capítulo 4 (subsubsecção 4.6.2.3). Além desta, foi ainda concebida uma outra aplicação em linguagem C#, que possibilita a leitura

<sup>11</sup> Como, por exemplo, na cabeça (figura 1.4.a), na orelha, no braço, na perna, no pulso ou no pé.

<sup>12</sup> Através de um sensor barométrico incorporado, cuja resolução máxima é de 0,016 mbar, o que corresponde a uma resolução altimétrica de cerca de 10 cm acima do nível médio do mar.

<sup>13</sup> A presença ou a ausência do dispositivo de *hardware Plug and Play* (PnP) é automaticamente detetada pela aplicação de *software* desenvolvida.

<sup>14</sup> Como, por exemplo, o movimento do cursor, o movimento produzido pelo *gamepad/joystick*, a ativação dos botões do rato, do teclado virtual e do *gamepad/joystick*, a ativação permanente para um botão do *gamepad/joystick*, a configuração do cursor para duplo clique ou para clique simples e ainda a possibilidade de execução das funcionalidades de rolagem (*scroll*) e de arrastar e soltar (*drag and drop*).

<sup>15</sup> Possuindo deteção automática da resolução do ecrã e compatível com múltiplos monitores de alta resolução (4K, 5K e 8K).

do estado e a configuração adicional do protótipo desenvolvido. Os parâmetros de configuração podem ser guardados em memória não-volátil (EEPROM) no dispositivo HID.

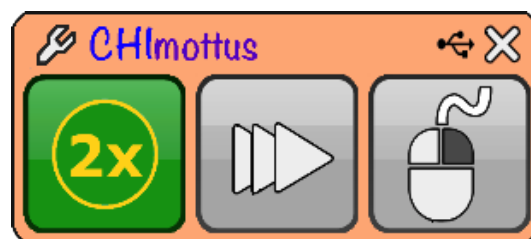


Figura 1.5: Aplicação de *software* desenvolvida em linguagem de programação C#, para utilização conjunta com o Dispositivo de Interface Humana, compatível com a comunicação quer por *Bluetooth*<sup>®</sup> (comunicação em modo SPP), quer por cabo USB (comunicação em modo HCI).

Foi validado experimentalmente um controlador de assistência inovador, desenvolvido e implementado no dispositivo de *hardware* de interface humana <sup>16</sup>. A sintonia do controlador eletrônico de assistência é realizada através de uma metodologia de otimização inspirada na natureza (capítulo 3, subsecção 3.4.5), com recurso ao Algoritmo dos Pirilampos (FA). O controlador proposto com *anti-windup*, descrito no capítulo 3 (subsecção 3.4.2) e no capítulo 4 (subsubsecção 4.6.2.5), é projetado tomando em conta um modelo matemático aproximado do comportamento humano. Este controlador recorre à informação relativa às coordenadas do cursor do computador <sup>17</sup> e à “intenção” do operador relativa à posição de destino do cursor, estimada através do Dispositivo de Interface Humana desenvolvido (figura 1.4). O controlador de assistência embutido no dispositivo de *hardware* com retroação permite a melhoria da usabilidade e do desempenho no acesso ao computador, podendo ser utilizado por pessoas com necessidades especiais.

No dispositivo <sup>18</sup> de *hardware* de colocação corporal concebido <sup>19</sup>, foi ainda implementado um modo de funcionamento da interface como *gamepad/joystick* ou como teclado, destinado à tecnologia assistiva e ao entretenimento (ex: permitindo a interação de pessoas com necessidades especiais com jogos adaptados e aplicações em ambientes de Realidade Virtual), e ainda um modo de funcionamento adicional como Sistema de Referência de Atitude e Rumo (AHRS) (figura 1.4.b), possibilitando o envio, em Tempo-Real, via *Bluetooth*<sup>®</sup> ou via série, da altitude e da informação relativa à orientação, em quatérniões (Jia, 2018; Kuipers, 2002), ou em ângulos de navegação de Tait-Bryan: *roll*  $\phi$  (rotação em torno do eixo longitudinal), *pitch*  $\theta$  (inclinação longitudinal) e *yaw*  $\psi$  (rotação em torno do eixo vertical), podendo ser utilizado para sistemas de navegação inercial.

<sup>16</sup> Que recorre a um sistema de comunicação desenvolvido no âmbito deste trabalho, com fio ou sem fios (através de rádio *Bluetooth*<sup>®</sup> de classe 2, com modo de poupança de energia).

<sup>17</sup> Enviadas, via *Bluetooth*<sup>®</sup> ou por cabo USB, para o dispositivo de *hardware* pela aplicação de *software* desenvolvida.

<sup>18</sup> Permitindo o *hardware* a compatibilidade com os Sistemas Operativos Windows<sup>®</sup>, macOS<sup>®</sup> e Linux<sup>®</sup>.

<sup>19</sup> Que pesa respetivamente 15 g e 10 g nas suas duas configurações (figuras 1.4.a e 1.4.b). Os dois módulos eletrónicos adicionais com antena integrada (designados de escravo e mestre), igualmente de pequenas dimensões (46 × 22 × 11 mm e 60 × 21 × 10 mm), desenvolvidos neste trabalho para a comunicação sem fios por *Bluetooth*<sup>®</sup>, são respetivamente colocados na porta USB de um computador (dispositivo escravo, inserido como uma “*pen drive*”) e, por exemplo, numa cadeira de rodas elétrica, dotada de uma saída própria de alimentação de baixa tensão (+5 V DC), para o dispositivo mestre.

O trabalho de investigação desenvolvido contribuiu para a consolidação da área emergente do controlo humano-máquina com recurso a sistemas eletrónicos, dentro do âmbito da ciência da cognição, nomeadamente quanto à inovação de procedimentos biónicos que envolvem as Interfaces Humano-Máquina (HMIs), possibilitando a publicação de diversos artigos científicos em revistas, capítulos de livros e conferências, conforme a lista de publicações (apêndice C) indexadas em bases de dados internacionais, realizadas no âmbito desta dissertação.

## 1.4 Estrutura da dissertação

### 1.4.1 Organização geral

A dissertação, elaborada em  $\text{\LaTeX}^{20}$ , encontra-se dividida em cinco capítulos, estruturados de forma a seguir um encadeamento lógico que facilite a sua leitura. Todos os capítulos incluem no início um resumo onde é efetuada a descrição sintética do capítulo, destacando os seus pontos chave mais importantes.

A dissertação está organizada da forma seguinte: no capítulo 1 é apresentado o enquadramento e motivação, as principais contribuições e a estrutura da dissertação. No capítulo 2 faz-se a descrição do estado da arte associado à integração humano-máquina. O capítulo 3 aborda os conceitos teóricos e as metodologias de modelagem, identificação e de projeto de controlo para os sistemas de interação que integram o humano, sendo introduzidas medidas de desempenho. Os principais resultados experimentais e a validação suportada na análise do desempenho são apresentados em detalhe no capítulo 4. Consideram-se aqui diversos casos de estudo, onde é possível constatar a melhoria dos índices de desempenho dos sistemas humano-máquina, com controladores projetados e implementados. Neste capítulo é ainda validado o protótipo de *hardware/software* concebido. No capítulo 5 são apresentadas em síntese as conclusões deste trabalho, bem como apontadas perspetivas para desenvolvimento futuro.

### 1.4.2 Convenções

Como sistema de unidades de medida utiliza-se o Sistema Internacional de unidades (SI). A citação de referências bibliográficas é efetuada seguindo o estilo autor-data de Harvard, sendo na bibliografia a sua ordenação feita por ordem alfabética do apelido do primeiro autor. As referências bibliográficas são apresentadas segundo os moldes adotados internacionalmente, com as adaptações devidas para a língua portuguesa.

A terminologia em língua portuguesa baseia-se nas Normas Portuguesas (NP) e na Comissão Eletrotécnica Internacional. Relativamente aos símbolos matemáticos usados, as variáveis e os escalares representam-se a itálico, os vetores são representados a negrito em letras minúsculas e as matrizes são representadas com letras maiúsculas a negrito.

---

<sup>20</sup> Com a ferramenta TeXstudio (<https://www.texpstudio.org/>), para o Sistema Operativo macOS®.



## Capítulo 2

# Estado da arte

*Quando aceitamos os nossos limites, somos capazes de os ultrapassar.*

Albert Einstein (1879 - 1955)

### Sumário

2.1	Evolução histórica . . . . .	13
2.2	Mecatrónica adaptada ao humano . . . . .	19
2.3	Metodologias para sistemas de assistência humano-máquina . . . . .	21
2.4	Tecnologias e aplicações de sistemas humano-máquina . . . . .	25
2.5	Alguns projetos em curso sobre fatores humanos . . . . .	28

### Resumo

Neste capítulo sintetizam-se as principais linhas de investigação, associadas ao tema da integração humano-máquina, que junta diferentes áreas científicas. Primeiramente é feita a descrição da sua evolução histórica, sendo de seguida apresentado o estado da arte no que concerne ao desenvolvimento recente dos sistemas com adaptação ao humano. Os principais contributos de diversos autores para a modelagem, a identificação e o controlo de sistemas humano-máquina e respetivas tecnologias e aplicações, são aqui abordados em breves descrições.

### 2.1 Evolução histórica

A integração humano-máquina tem sido tema de estudo principalmente desde a segunda metade do século XX, havendo desde essa época diversos estudos acerca da modelagem dinâmica do operador (Gaines, 1969; Gray, 2007; Jirgl et al., 2015; Sheridan & Ferrell, 1975), especialmente na área da engenharia aeronáutica. Destacam-se, entre o final dos anos quarenta e a década de sessenta, os trabalhos de Tustin e de McRuer no campo da modelagem do comportamento dos pilotos e das aeronaves, incorporando o elemento humano, que propuseram, partindo de certas hipóteses simplificativas, a introdução de um modelo de controlo humano com recurso à utilização de uma função de transferência. As experiências realizadas na época revelaram que os operadores humanos manifestavam comportamentos regulares em tarefas manuais simples sobre máquinas e

equipamentos. Atendendo a este facto, é razoável pensar na adoção de modelos matemáticos que permitam reproduzir, com um certo grau de confiabilidade, o comportamento do operador humano sobre uma máquina ou equipamento.

O trabalho pioneiro do cientista britânico Arnold Tustin, consistiu na introdução de um modelo para o controlador humano baseado na teoria dos servomecanismos aplicada à análise do controlo manual (Tustin, 1947). Para descrever o comportamento do operador, Tustin propôs a função de transferência

$$H(s) = K_H \frac{T_L s + 1}{s} e^{-\tau s} \quad (2.1)$$

onde  $K_H$  representa o ganho do comportamento humano, sendo  $T_L$  uma constante de tempo de avanço e  $\tau$  o atraso do operador.

Ragazzini introduz em 1948 o modelo do Controlador Proporcional, Integral e Derivado (PID) para o operador (Ragazzini, 1948), propondo que os seres humanos podem ser considerados como sistemas variantes no tempo, com aleatoriedade. Ragazzini, mostrou ainda que as diferenças entre os indivíduos devem ser tomadas em conta para o projeto de controladores em sistemas humano-máquina.

Nas décadas de cinquenta e de sessenta foram dados por McRuer e Krendel importantes contributos para a modelagem do operador humano, validados através de experiências de seguimento manual (figura 2.1), com recurso à geração de sinais de referência aleatórios.

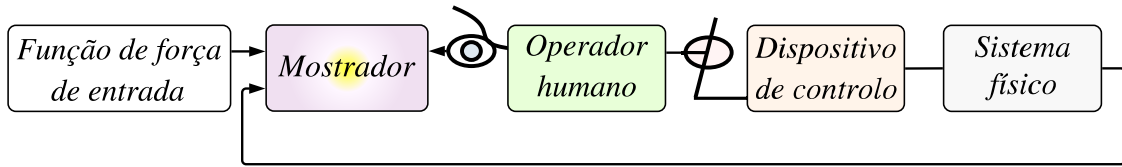


Figura 2.1: Diagrama de blocos que ilustra os diversos elementos do paradigma do seguimento manual (Gray, 2007).

Nos anos sessenta destaca-se a introdução do modelo de *Crossover* (McRuer & Jex, 1967; McRuer, 1980; Macadam, 2003; Pool et al., 2009), que agrega o controlador humano e o sistema físico numa entidade única, por forma a poder sintetizar a representação do sistema de interação humano-máquina. O modelo de *Crossover* (2.2) consiste numa aproximação do sistema humano-máquina, em torno da frequência de cruzamento para ganho unitário (*Crossover*), a um tempo de atraso  $\tau$  e a um integrador. De acordo com este modelo, o operador humano irá adaptar o seu desempenho compensando a dinâmica do sistema físico, sendo

$$H(s)M(s) \approx \omega_c \frac{e^{-s\tau}}{s} \quad (2.2)$$

$$H(j\omega)M(j\omega) \approx \omega_c \frac{e^{-j\omega\tau}}{j\omega} \quad (2.3)$$

na vizinhança da frequência de cruzamento  $\omega_c$ . Na frequência de cruzamento ( $\omega = \omega_c$ ) o ganho do sistema global (2.3) é unitário (0 dB). O termo  $H(s)M(s)$  representa a combinação do sistema humano  $H(s)$  com o sistema máquina  $M(s)$ , para tarefas manuais de seguimento que incluem

perturbações aleatórias. Este modelo, expressa a noção da invariância dinâmica sob certas condições. De acordo com a interpretação do modelo de *Crossover*, verifica-se uma adaptação humana à dinâmica variável da máquina, pelo que o operador humano atuará de modo a que a função de transferência do anel de controlo resultante possa garantir os critérios necessários à obtenção de um bom (e estável) sistema de controlo.

Baseado no modelo de *Crossover* foi ainda proposto por McRuer et al., em 1965, um modelo quase-linear (2.4) para a caracterização do comportamento do operador durante a realização de tarefas de seguimento manual compensatório (Lone & Cooke, 2014; McRuer et al., 1965; Pool et al., 2009), reforçando a interpretação de que a resposta humana poderia ser obtida em termos de uma função de transferência, acrescida de um termo remanescente  $T_{\text{rem}}$  relativo à porção da saída não linearmente correlacionada com a entrada, ficando

$$H(s) = K_H \frac{T_L s + 1}{T_I s + 1} \frac{e^{-\tau s}}{T_N s + 1} + T_{\text{rem}} \quad (2.4)$$

onde  $K_H$  é o ganho do comportamento humano,  $T_I$  é uma constante de tempo de atraso,  $T_L$  é uma constante de tempo de avanço,  $T_N$  representa a constante de tempo do sistema neuromuscular humano, e  $\tau$  significa o atraso de reação do operador. O princípio de *Crossover* torna-se a base para o desenvolvimento de mais modelos (2.4, 2.5, 2.6 e 2.7), com as suas variantes mais utilizadas. Os trabalhos de McRuer et al. (1965) tiveram impacto significativo no desenvolvimento dos sistemas de controlo para a aviação e ainda na indústria automóvel, nomeadamente no projeto de sistemas de controlo para apoio ao condutor. A partir do modelo de *Crossover* (2.2) foi ainda desenvolvido por McRuer et al. um modelo que pudesse incluir também a dinâmica da componente neuromuscular. McRuer introduz o modelo de exatidão (2.5), de 3ª ordem, que toma em consideração a dinâmica neuromuscular humana, no qual  $\zeta_N$  e  $\omega_N$  representam, respetivamente, o fator de amortecimento e a frequência natural de oscilação do sistema neuromuscular (Jirgl et al., 2015).

$$H(s) = K_H \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_N^2} + \frac{2\zeta_N}{\omega_N} s + 1} \frac{T_L s + 1}{(T_I s + 1)} e^{-\tau s} \quad (2.5)$$

O modelo de 2ª ordem de Tustin-McRuer (2.6), que despreza o polo mais rápido de (2.5), é uma das funções de transferência mais conhecidas dos sistemas que integram o operador humano, sendo  $T_N$  uma constante de tempo do sistema neuromuscular.

$$H(s) = K_H \frac{T_L s + 1}{(T_N s + 1)(T_I s + 1)} e^{-\tau s} \quad (2.6)$$

O modelo de Gross (2.7) constitui uma simplificação de 1ª ordem do modelo de exatidão (2.5) e do modelo de Tustin-McRuer (2.6), sendo definido por

$$H(s) = K_H \frac{T_L s + 1}{T_I s + 1} e^{-(\tau + \tau_N)s} \quad (2.7)$$

com  $T_I$  e  $\tau_N$  representando respetivamente uma constante de tempo de atraso e a componente singular do atraso da resposta do piloto humano.

A teoria de controlo moderna introduz a representação do sistema de controlo em espaço de estados, sendo que uma solução ótima de controlo pode ser obtida através da minimização de uma função de custo (Kalman & Bucy, 1961). Na sequência dos contributos que foram dados na década de sessenta à teoria de controlo moderna, Baron e Kleinman aplicaram-na ao problema do controlo manual (Baron & Kleinman, 1969). A solução de controlo ótima iria então refletir o comportamento de um operador humano bem treinado, tomando em conta idênticas limitações da máquina. Nos estudos de Kleinman sobre a dinâmica dos pilotos (Kleinman & Perkins, 1974), a função de transferência de um piloto é associada à sucessão dos atrasos atribuídos ao sistema neuromuscular. Na figura 2.2 apresenta-se o diagrama de blocos associado ao Modelo de Controlo Ótimo (OCM) de um piloto durante a realização de tarefas de seguimento manual compensatório.

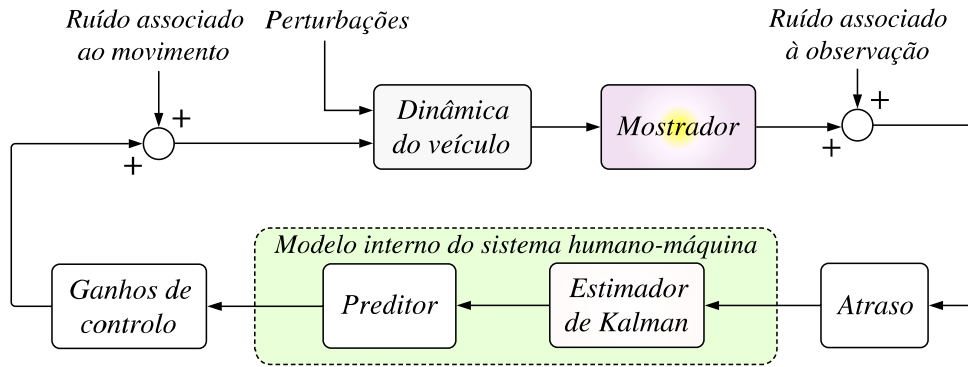


Figura 2.2: Diagrama de blocos do sistema de controlo ótimo associado ao desempenho dos pilotos (Lone & Cooke, 2014).

O sinal para controlo é afetado por ruído de observação, sofrendo um atraso em virtude do tempo de reação do operador humano. O estimador/preditor de Kalman processa este sinal com ruído, de forma a obter a melhor predição da atividade de controlo requerida para a minimização de uma medida de desempenho. Os ganhos de controlo são obtidos resolvendo o problema Linear Quadrático Gaussiano (LQG) para a função de custo  $J_p(u_p)$ , dada por

$$J_p(u_p) = E \left\{ \lim_{\eta \rightarrow \infty} \frac{1}{\eta} \int_0^{\eta} (y_p^T Q_p y_p + u_p^T R_p u_p + \dot{u}_p^T S_p \dot{u}_p) dt \right\} \quad (2.8)$$

onde as matrizes  $Q_p$  e  $R_p$  de (2.8) representam, respetivamente, as ponderações nas saídas  $y_p$  do modelo interno e da ação de controlo  $u_p$  do piloto. Por sua vez, a matriz  $S_p$  encontra-se associada ao ritmo de controlo dos pilotos, dependendo do sistema neuromuscular e da tendência contra as ações de controlo repentinas (Lone & Cooke, 2014).

Em 1974, Shinnars propõe para modelar o operador a utilização de Modelos Auto-Regressivos de Média Móvel (ARMAs), obtidos a partir de experiências manuais de seguimento (Shinnars, 1974). Nos anos oitenta é introduzido o conceito da simulação do operador humano (Harris et al., 1989), que recorre a regras e a técnicas de inteligência artificial. Em 1993 é proposto um método para compensar o atraso do operador, através do recurso ao preditor de Smith (Miall et al., 1993). Nos anos noventa, Mitsuo Kawato postula que o controlador humano é constituído

por estruturas proativas e retroativas, e que através do processo de aprendizagem surge uma alteração no sentido da retroação para a proação. Kawato introduz o modelo de aprendizagem por realimentação do erro (figura 2.3), que assume a existência de modelos inversos e diretos associados à dinâmica dos movimentos. Nesta abordagem, o cerebelo adquire o modelo da máquina como se de um modelo inverso, no sentido proativo se tratasse. Mais recentemente, em 1999, e com os avanços dados acerca da compreensão do funcionamento do cérebro, é introduzida por Kawato a teoria que assume que o operador humano detém modelos inversos e diretos da dinâmica dos movimentos (Kawato, 1999), sendo posteriormente desenvolvido por Kawato e Wolpert o conceito de Controlo por Identificação e Seleção.

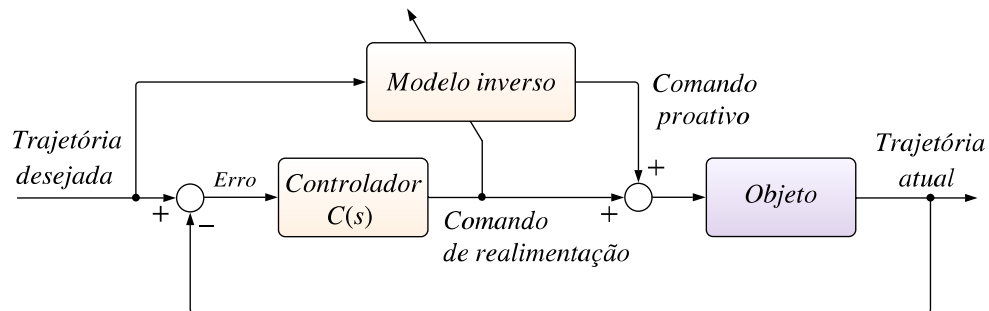


Figura 2.3: Modelo geral de aprendizagem por realimentação do erro (Kawato, 1999; Kawato, 2009).

No ano 2000, é comprovada experimentalmente a existência dos modelos internos, existentes no cerebelo, associados às tarefas motoras realizadas pelos seres humanos (Imamizu et al., 2000; Ito, 2000). Haruno, Wolpert e Kawato desenvolvem então o modelo geral de aprendizagem por realimentação do erro, expandindo o modelo inverso num controlador e o modelo direto num preditor, originando o modelo de Controlo por Identificação e Seleção (MOSAIC) (Harashima & Suzuki, 2008; Haruno et al., 2001), representado na figura 2.4. O modelo MOSAIC reflete assim a noção de divisão da experiência através dos modelos proativos.

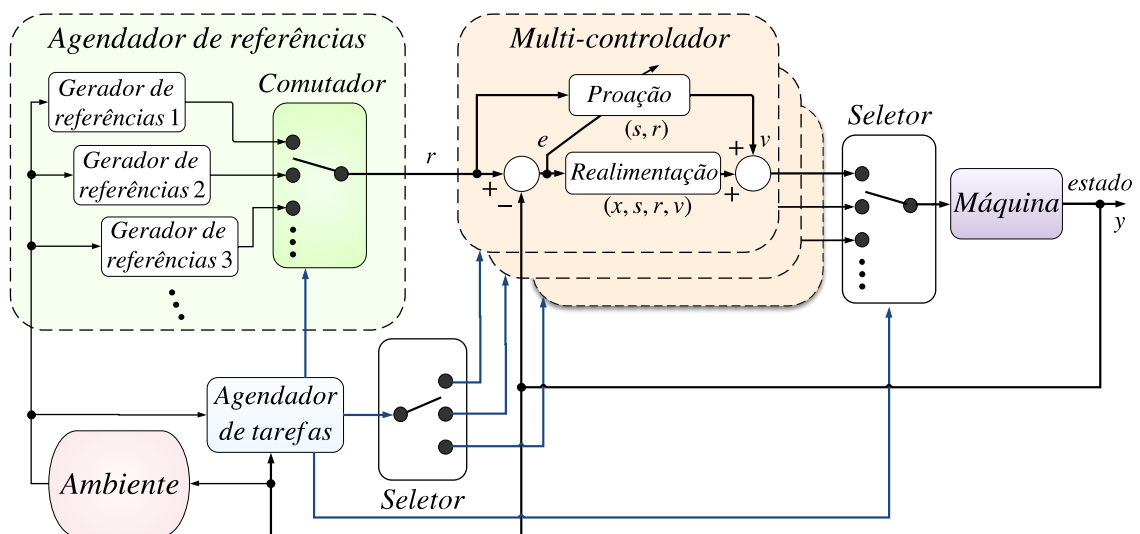


Figura 2.4: Diagrama de blocos do modelo humano de Controlo por Identificação e Seleção (MOSAIC) (Harashima & Suzuki, 2008).

A investigação sobre a integração humano-máquina tem sido promovida, atualmente, em muitos países, com particular destaque para o Japão, Estados Unidos e Finlândia. Para melhor compreender o processo de aprendizagem humana, é dado particular enfoque às ciências da cognição, recorrendo-se a técnicas não intrusivas<sup>1</sup> como a Espetroscopia de Infravermelho Próximo (NIRS) para analisar a atividade cerebral nas áreas de Brodmann (figuras 2.5 e 2.6), durante a realização de certas tarefas de controlo manual (Suzuki et al., 2005b; Suzuki et al., 2007; Suzuki et al., 2013).

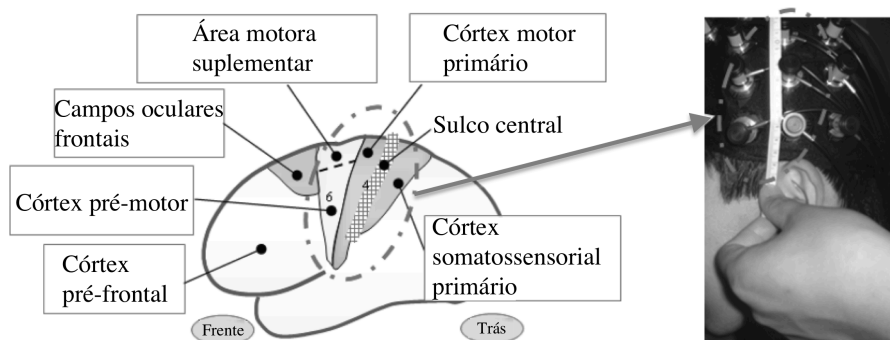


Figura 2.5: Utilização de Espetroscopia de Infravermelho Próximo (NIRS) para a análise da atividade do córtex cerebral (traduzido de <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.5772/55740/>) (Suzuki et al., 2013).

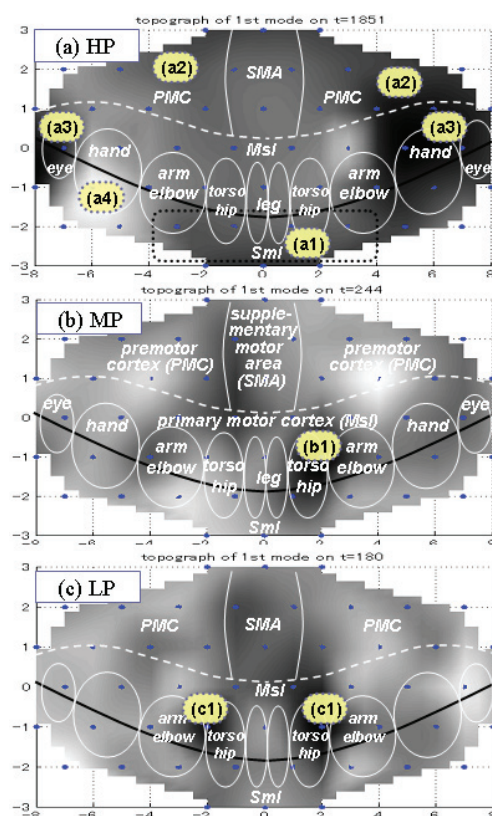


Figura 2.6: Imagens topográficas, obtidas através de NIRS, da atividade do córtex cerebral de operadores humanos com diferentes níveis de desempenho, durante a realização de uma tarefa manual de equilíbrio (<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.5772/55740/>) (Suzuki et al., 2013).

<sup>1</sup> O eletrocorticograma é um exemplo de uma técnica intrusiva para a análise da atividade cerebral.

Um dos aspetos a destacar, é o facto de a atividade no córtex cerebral poder diferir em tarefas idênticas realizadas por diferentes operadores, acentuando-se essas discrepâncias para os operadores humanos que evidenciam maiores diferenças no desempenho. Para o caso dos operadores que apresentam maior desempenho é confirmada uma maior atividade em áreas do córtex, associadas à observação do que em algumas áreas do controlo motor. Alguns estudos revelam ainda que os operadores que possuem maior perícia apresentam normalmente características mais complexas em termos de resposta em frequência (Suzuki & Harashima, 2005).

Alguns desenvolvimentos propostos incluem, por exemplo, a manipulação do comportamento do operador humano através da visão com dinâmica distorcida (Kobayashi et al., 2006). Esta metodologia, apresentada de forma conceptual na figura 2.7, permite desenvolver um esquema de assistência com recurso a um “Educador de Desempenho”, através da apresentação ao operador de uma imagem fictícia do sistema a controlar, no caso um pêndulo invertido simulado, cuja dinâmica é deliberadamente distorcida para permitir aumentar o desempenho.

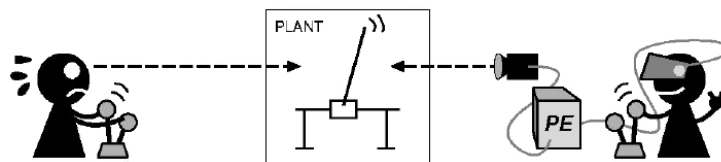


Figura 2.7: Ilustração do sistema de controlo através do Educador de Desempenho (PE) proposto por Kobayashi et al. (2006), (<https://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE01995007/>).

## 2.2 Mecatrónica adaptada ao humano

A Mecatrónica Adaptada ao Humano (HAM) (Harashima & Suzuki, 2008) é a área de investigação que envolve a assistência do operador para a melhoria do desempenho. Este conceito (Furuta, 2003; Harashima & Suzuki, 2006) foi inicialmente proposto em 2003 pelo *21<sup>st</sup> century Centre of Excellence* (COE) da Universidade Denki, em Tóquio, sob o patrocínio do Ministério da Educação, Cultura, Desporto, Ciência e Tecnologia do Japão.

A ideia chave da HAM centra-se no desenvolvimento de novos dispositivos, que tomam em consideração o fator humano, e que alteram as funções e a estrutura do sistema humano-máquina para a melhoria do desempenho operativo (Yu, 2008). De acordo com Suzuki (2010), um dispositivo mecatrónico adaptado ao humano pode ser definido como «um sistema capaz de reconhecer as características do operador, e de se adaptar e reagir de forma ótima à perícia e destreza do utilizador humano.».

O conceito da Mecatrónica Adaptada ao Humano (Harashima & Suzuki, 2006; Suzuki, 2010), ou mecatrónica adaptada e amiga do humano (Habib, 2008), resulta de uma combinação multidisciplinar da teoria do controlo, da mecatrónica e das ciências da cognição. A figura 2.8 ilustra a interligação entre as principais disciplinas associadas ao conceito da HAM. A investigação da HAM tem como principal objetivo o desenvolvimento de novas metodologias, sistemas de controlo e dispositivos que permitam melhorar a integração humano-máquina.

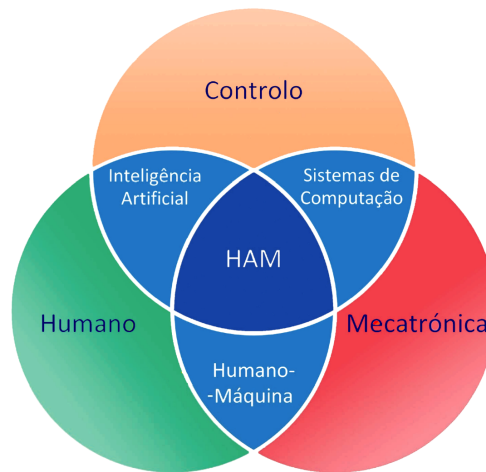


Figura 2.8: Diagrama adaptado de interligação das principais disciplinas associadas ao conceito da HAM (Harashima & Suzuki, 2006).

O estudo dos sistemas de adaptação ao humano pressupõe o domínio de diferentes áreas, como a inteligência artificial, os sistemas de computação, a teoria de controlo, a eletrónica e a mecânica. A pesquisa sobre a HAM envolve em geral os tópicos seguintes:

- Modelagem dos sistemas humano-máquina.
- Identificação das características do operador humano.
- Teoria fundamental do controlo em sistemas humano-máquina.
- Metodologias de controlo e de aprendizagem.
- Estudo da inteligência humana e das ciências da cognição.
- Identificação dos comportamentos associados à operação.
- Domínio da eletrónica e da mecânica.
- Estudo de sensores e de atuadores.
- Desenvolvimento de Interfaces Humano-Máquina e de Interfaces Humano-Computador.
- Projeto de sistemas de controlo para assistência ao humano.

Assiste-se, recentemente, ao ressurgimento da investigação em novas metodologias de controlo e novas abordagens de identificação HAM/HMI, elevando o conhecimento sobre as técnicas de assistência e de modelagem dos sistemas humano-máquina a novos estágios de desenvolvimento. Emerge atualmente em muitas atividades centradas nos fatores humanos um renovado interesse no projeto de dispositivos de assistência ao operador (figura 2.9), devido ao seu impacto relevante em termos da produtividade, eficiência, custo energético, segurança e conforto.



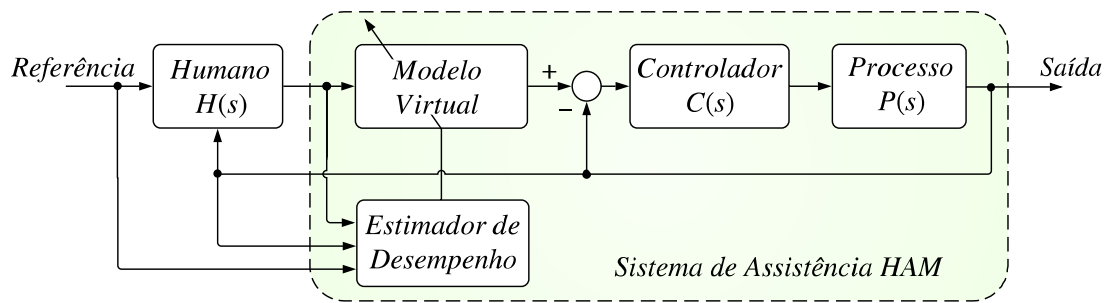


Figura 2.9: Diagrama de blocos de um sistema de assistência com Mecatrônica Adaptada ao Humano (Suzuki et al., 2006).

## 2.3 Metodologias para sistemas de assistência humano-máquina

A pesquisa acerca das metodologias de modelagem, de identificação e de controle para o desenvolvimento de sistemas de assistência humano-máquina abrange presentemente diversas linhas de investigação, tais como a filtragem Bayesiana (Suzuki & Harashima, 2012), a análise de Markov (Bortolami et al., 2010; Palmroth et al., 2009), a modelagem comutada, fracionária, proativa e retroativa (Khemane et al., 2010; Okuda et al., 2009), o desenvolvimento de modelos discretos de estado-transição (Suzuki et al., 2004), de Modelos de Retroação de Estados com Base em Dados Discretos (DDBSFM) (Tervo, 2010a) e de Modelos de Controle de Estratégia Variável (VSMs), a aprendizagem supervisionada, a Aprendizagem por Reforço (RL), a estimação da intenção com recurso a mapas auto-organizáveis (Kohonen, 2014; Suzuki et al., 2013), as técnicas de identificação ARX, as estratégias difusas e neuro-difusas (Celik & Ertugrul, 2010; Feng, 2010), as abordagens de controle intermitente, o desenvolvimento de Modelos Modificados de Controle Ótimo (MOCMs), (Tervo & Koivo, 2010), os algoritmos meta-heurísticos de otimização inspirados na natureza, (Agarwal & Mehta, 2014; Yang, 2014b) e as técnicas de transferência de aprendizagem (Jiang et al., 2010; Pan & Yang, 2010; Wu et al., 2013; Yang et al., 2013a), entre outras.

As estratégias meta-heurísticas de otimização estão atualmente a atrair a crescente atenção por parte dos investigadores que lidam com as aplicações de controle. Um Controlador Proporcional, Integral e Derivado (PID) (Ogata, 2010) é por vezes insuficientemente sintonizado devido às alterações da dinâmica do processo, causadas pelas não linearidades do sistema. As técnicas tradicionais de sintonia de Controladores Proporcionais, Integrativos e Derivados (PIDs) são normalmente baseadas nos métodos de Ziegler-Nichols, de Cohen-Coon, no método do relé e em técnicas analíticas baseadas no *root-locus*. Os métodos meta-heurísticos inspirados na natureza (Bendjehaba et al., 2013; Katal et al., 2014; Rukslin et al., 2016) têm sido utilizados em controle de processos como uma alternativa válida de sintonia de controladores. Os desenvolvimentos recentes dos algoritmos meta-heurísticos inspirados na natureza (Agarwal & Mehta, 2014; Fister Jr. et al., 2013; Yang, 2010b) incluem os Algoritmos Genéticos (GAs), a Otimização por Colônia de Formigas (ACO), a Otimização por Enxame de Partículas (PSO), o Algoritmo Memético (MA), o Algoritmo de Otimização do Forrageamento das Bactérias (BFOA), o Algoritmo de Colônia

Artificial de Abelhas (ABCA), o Algoritmo dos Pirlampos (FA) (Yang, 2014a), a Otimização Baseada em Biogeografia (BBO), o Algoritmo da Reprodução dos Pássaros Cuco (CSA) (Yang, 2014a), o Algoritmo Inspirado na Ecolocalização Utilizada Pelos Morcegos (BA), o algoritmo de Otimização por Aranhas Sociais (SSO) (Ahmadi & Salari, 2017) e os Algoritmos Inspirados na Polinização de Flores (FPA). Obviamente que nem todos os algoritmos meta-heurísticos são inspirados na biologia. Muitos outros derivam também dos sistemas físicos e químicos, como por exemplo, o Algoritmo de Procura Baseado em Galáxias (GBS), o Algoritmo de Otimização Espiral (SOA) e o Algoritmo de Gotas de Água Inteligentes (IWD), dos sistemas sociais (ex: o Algoritmo de Competição Imperialista (ICA)), e até em música (ex: o Algoritmo de Busca Harmônica (HS)).

Alguns trabalhos de investigação dão também ênfase à problemática da quantificação da perícia (Haavisto & Remes, 2010; Hisham et al., 2015; Parthornratt et al., 2011; Sasaki et al., 2007) e da exatidão (Tung et al., 2015), da quantificação do tremor em Interfaces Humano-Máquina (Ataş, 2017; Riviere & Thakor, 1996), da análise da deterioração dos movimentos do utilizador (Alves et al., 2016; Butt et al., 2017) e da Avaliação da Confiabilidade Humana (HRA) (Baziuk et al., 2018; Havlikova et al., 2015), do compromisso velocidade-exatidão de Fitts (Fu, 2016; Murata et al., 2014), dos modelos de aprendizagem existentes no cerebelo (Kawato, 2009) e dos conceitos associados à sensação e à percepção (Goldstein, 2002).

No estudo da HAM consideram-se diversas classificações para o conceito de habilidade humana, derivadas do modelo de Rasmussen da hierarquia do comportamento humano (Rasmussen et al., 1994; Suzuki, 2010):

Nível 1 - Habilidade na cooperação: conversação, negociação e divisão dos papéis.

Nível 2 - Habilidade no planeamento: planeamento de tarefas e otimização dos processos.

Nível 3 - Habilidade cognitiva: reconhecimento das circunstâncias e compreensão dos significados.

Nível 4 - Habilidade da tarefa: execução de subtarefas segmentadas ou ações.

Nível 5 - Habilidade do movimento voluntário: manipulação de dispositivos de interface e controlo do movimento da máquina.

Nível 6 - Habilidade na percepção: sensação e observação.

Para a correta realização de uma operação é necessário o processamento adequado de cada nível, bem como a coordenação efetiva entre os diferentes níveis da hierarquia do comportamento.

O desenvolvimento de sistemas de controlo para adaptação ao humano envolve essencialmente três etapas:

- Identificação das principais características do sistema humano-máquina.
- Quantificação do desempenho global.
- Projeto, implementação e teste do controlador de assistência.

O primeiro estágio do desenvolvimento deste tipo de sistemas de controlo é considerado um problema de processamento de sinais e de identificação de sistemas, que implica desenvolver os procedimentos teóricos e experimentais com vista à obtenção de um modelo aceitável, que possa caracterizar com rigor, o sistema humano-máquina. A figura 2.10 ilustra um diagrama de blocos de um sistema que inclui um modelo do operador humano de baixa ordem  $H(s)$  de (2.7 e 2.9), estimado com recurso a técnicas de identificação ARX (Suzuki et al., 2005a).

$$H(s) = \frac{K_{dh}s + K_{ph}}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (2.9)$$

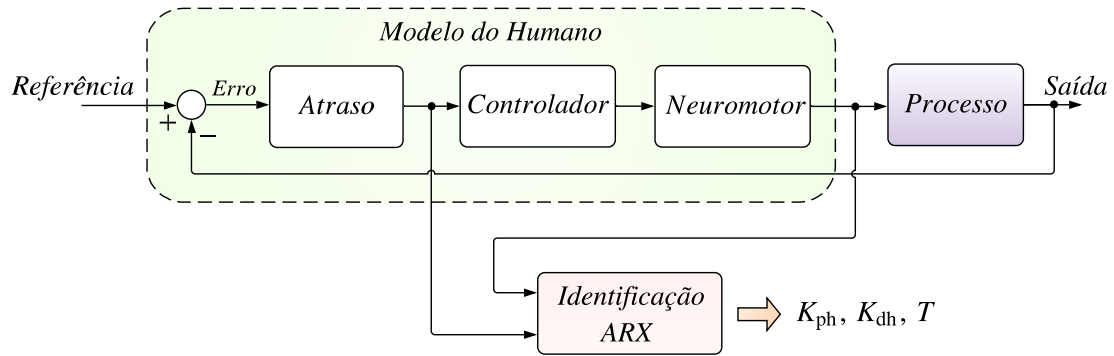


Figura 2.10: Diagrama de blocos de um sistema humano-máquina, que inclui um Modelo Auto-Regressivo com Entradas Exógenas (ARX) do operador humano (Suzuki et al., 2005a).

Na segunda etapa, são utilizados os dados experimentais obtidos para poder quantificar o desempenho global do sistema humano-máquina. A comparação entre certos parâmetros ideais e certos parâmetros identificados, poderá providenciar uma estimativa mais exata quanto ao desempenho do sistema humano-máquina em análise. Seguidamente, e tendo em consideração o nível de desempenho presente, é implementado um controlador, capaz de modificar a “quantidade de assistência” a dar ao operador. Este controlador pode ter em conta o modelo ideal e os dados reais adquiridos sobre o desempenho. Os parâmetros de controlo, associados ao controlador de assistência do sistema humano-máquina podem ser obtidos por métodos analíticos ou baseados no conhecimento. Na abordagem baseada no conhecimento, a otimização dos parâmetros de controlo é geralmente realizada através do recurso a um sistema pericial, que infere acerca da adequabilidade do parâmetro atual com base nos resultados de desempenho  $q_d$ , onde a função proposta de otimização heurística (2.10) poderá, por exemplo, ser obtida por intermédio de um sistema de inferência difuso.

$$\xi^* = \text{Otimização Heurística}(q_d, \xi) \quad (2.10)$$

Esta abordagem pode constituir uma alternativa viável para os casos em que não seja possível obter um modelo matemático aceitável do comportamento humano-máquina, estando-se perante um problema de Controlo Adaptativo Focado no Desempenho (SAC). Na figura 2.11 são apresentadas as diversas fases da metodologia SAC, propostas por Tervo et al. (2010a). O primeiro procedimento, após a aquisição dos dados, consiste no reconhecimento da intenção do operador. Para tal, podem ser utilizadas diversas metodologias, como as baseadas nos Modelos Ocultos de

Markov (HMMs) (Tervo, 2010b; Tervo et al., 2010a). Na fase de adaptação, os parâmetros no vetor  $\xi$  de (2.10) são novamente utilizados para o cálculo dos novos valores  $\xi^*$  (Tervo, 2014). No método de adaptação poderão ser utilizadas regras de aprendizagem iterativa. No entanto, e para não comprometer a usabilidade do sistema, esta adaptação não poderá ser demasiado rápida. A terceira e última etapa consiste no projeto do controlador de assistência, e na sua implementação e validação.

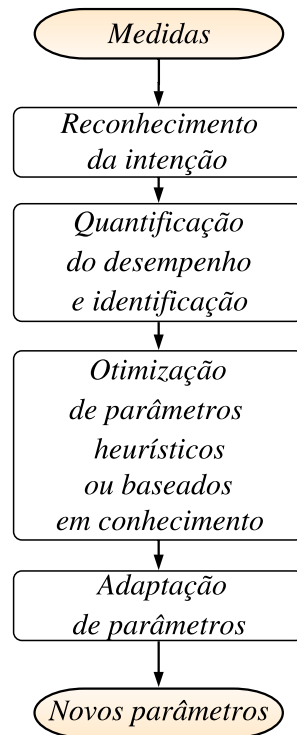


Figura 2.11: Fases de um sistema de Controle Adaptativo Focado no Desempenho (SAC) (Tervo, 2014).

Atualmente, existem ao nível do *hardware* três tipos principais de soluções comerciais para a implementação de controladores eletrónicos para assistência, designadamente: plataformas com microcontrolador (figura 2.12) (Evans et al., 2013; Langbridge, 2015; Monk, 2013; Yang et al., 2010); plataformas eletrónicas com *Field-Programmable Gate Arrays* (FPGAs) (Emilio, 2015; Kolodko et al., 2005; Li et al., 2003) e Computadores de Placa Única (SBCs) (figura 2.13) (Gay, 2014; Molloy, 2014).

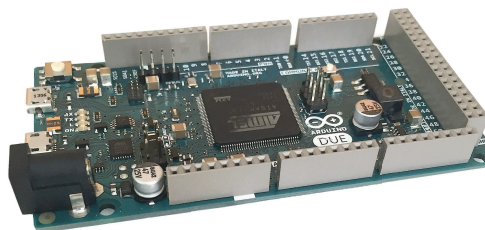


Figura 2.12: Plataforma ARDUINO® Due, contendo o microcontrolador ARM® Cortex® SAM3X8E (Atmel®-Microchip®) de 84 MHz.

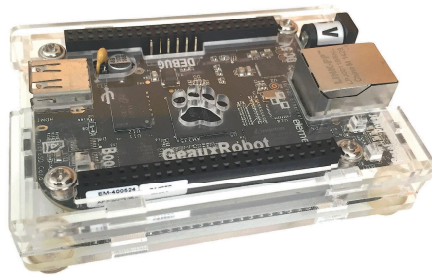
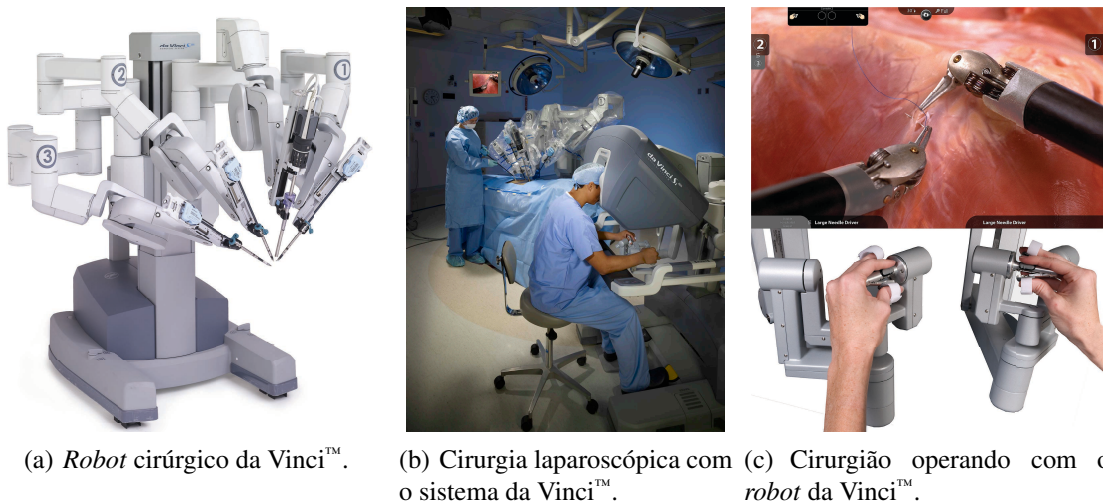


Figura 2.13: Computador de Placa Única Beaglebone™ Black, incluindo o microprocessador AM335x Sitara™ (Texas Instruments) de 1 GHz e o Sistema Operativo Linux®.

## 2.4 Tecnologias e aplicações de sistemas humano-máquina

Exemplos atuais de tecnologias e aplicações envolvendo sistemas humano-máquina podem ser encontrados no projeto de Interfaces Humano-Máquina e dispositivos de acesso ao computador (Bazrafkan et al., 2015; Kawala-Janik et al., 2015; Li & Yu, 2015; Lopes et al., 2016; López et al., 2014; Mendez et al., 2017; Spüler, 2015), em tecnologia assistiva para pessoas com necessidades especiais (Carlson & del R. Millan, 2013; Cheung & Peng, 2015; Cook & Polgar, 2015; Gips et al., 2015; Nozaki et al., 2016), no projeto de dispositivos de computação vestível (Ahn et al., 2018; Mann, 2015; Starner, 2015), na biônica (Fukushima et al., 2016) e em sistemas cirúrgicos laparoscópicos (Bechet et al., 2015; Escobar & Falcone, 2014; Fontanelli et al., 2018) (figura 2.14).



(a) Robot cirúrgico da Vinci™.

(b) Cirurgia laparoscópica com o sistema da Vinci™.

(c) Cirurgião operando com o robot da Vinci™.

Figura 2.14: Sistema cirúrgico laparoscópico da Vinci™ (©2017 Intuitive Surgical, Inc.).

Outras tecnologias emergentes e aplicações para sistemas humano-máquina são os sistemas de Captura de Movimento (MoCap) humano (Kok et al., 2014; Vydhyathan & Bellusci, 2018), o reconhecimento das atividades humanas (Benalcázar et al., 2017; Kim et al., 2017; Machado et al., 2015) e a análise do comportamento, cognição e emoção (Gamboa et al., 2014), a teleoperação e as redes de dispositivos com comunicação sem fios incorporados na proximidade ou no corpo humano (WBAN) (Chu, 2018; Li et al., 2017; Teshome et al., 2018), o controle mioelétrico (Csapo et al., 2016; Huang et al., 2016; Pasquina et al., 2015) (figura 2.15.a), o entretenimento (Muñoz

et al., 2010) e o desenvolvimento de novas interfaces de comunicação (Gips et al., 2015; Han & Im, 2018; Rawat et al., 2016; Xavier et al., 2017) (figuras 2.15 e 1.1). Outras áreas de aplicação dos sistemas humano-máquina são a indústria automóvel (Kun, 2018; Li et al., 2014), a aviação (Jirgl et al., 2015), a automação e robótica (Leigh et al., 2018), a indústria florestal renovável (Morales et al., 2015; Tervo et al., 2010b) e a mineração (Pietilä & Haavisto, 2010).



(a) Bracelete Myo™ Gesture Control, para controlo gestual mioelétrico.



(b) Interface Google Glass™ (adaptado de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Google\\_Glass\\_with\\_frame.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Google_Glass_with_frame.jpg)).



(c) Interface Cérebro-Computador sem fios Emotiv Insight Brainwear® EEG.

Figura 2.15: Exemplos recentes de interfaces de comunicação sem fios: (a) bracelete Myo™<sup>2</sup>; (b) Google Glass™<sup>3</sup>; (c) Interface Cérebro-Computador (BCI) Emotiv Insight Brainwear® Wireless EEG<sup>4</sup>.

Na tabela 2.1 apresentam-se diversos exemplos de tecnologia assistiva (Cook & Polgar, 2015; Lupu et al., 2017). Esta área de investigação encontra-se em forte expansão, atendendo à importância atual das tecnologias da informação e da comunicação. Relativamente ao *software* comercial para tecnologia assistiva, salienta-se a ferramenta Grid 3 da empresa Smartbox™<sup>5</sup>, que permite melhorar o acesso ao computador de pessoas com necessidades especiais.

<sup>2</sup> O utilizador humano interage, recorrendo a ações musculares que resultam dos movimentos do braço e da mão.

<sup>3</sup> A comunicação é feita pelo utilizador humano, recorrendo ao *display*, à Unidade de Medição Inercial (IMU) e ao altifalante integrado.

<sup>4</sup> Sistema de comunicação que utiliza elétrodos, para analisar a atividade elétrica do cérebro humano através de Eletroencefalografia (EEG), em aplicações de *Brain Mobile Interfacing* (BMI). Este tipo de interface é à partida adequado para a obtenção de uma solução multinível com poucos níveis de decisão, através da realização de ordens simples comandadas pela mente.

<sup>5</sup> <https://www.thinksmartbox.com/>.



Tabela 2.1: Exemplos de tecnologia assistiva.

Tecnologia	Utilização
Esquemas de cor	Permite ao utilizador ver mais facilmente o ecrã do computador
Alargamento do ecrã	Permite ao utilizador com fraca visão ver mais facilmente o ecrã do computador
Legendas fechadas	Tradução de voz e sons por legendas para utilizadores com dificuldades de audição
Teclado virtual	Entrada de texto para utilizadores que não conseguem usar um teclado normal
Predição de palavras	Aumento da velocidade da entrada de texto para um teclado virtual
Teclados equivalentes	Possibilita o acesso alternativo ao teclado e aos menus de controlo
Interfaces de botão único	Permitem o controlo de um equipamento através de um botão único
Reconhecimento visual	Possibilita a identificação de objetos e pessoas por utilizadores com fraca visão
Reconhecimento Ótico de Caracteres	Possibilita a leitura de texto por utilizadores invisuais
Reconhecimento de voz	Entrada de texto para os utilizadores que não conseguem usar um teclado normal
Síntese de voz	Discurso gerado por computador para utilizadores mudos ou com distúrbios da fala
Controlo de descrições	Permite aos invisuais uma descrição do ícone que é lido através de síntese de voz
Teclas do rato	Controlo do cursor através do teclado, para os utilizadores que não podem usar o rato
Tempo de aceitação do rato	Permite a ativação dos botões do rato através de um tempo de aceitação ( <i>dwell time</i> )
<i>Sip-and-puff</i>	Permite o controlo de um dispositivo através da respiração (aspiração ou assopro)
Computação vestível	Permite a comunicação permanente através de um dispositivo de computação
Rastreamento facial	Permite controlar o cursor do computador através dos movimentos da face
<i>Eye-gaze</i>	Permite comunicar e controlar um dispositivo através do olhar
Reconhecimento cerebral	Possibilita comandar um dispositivo através da mente

Ao nível dos dispositivos para tecnologia assistiva (Harris, 2017) destacam-se, atualmente, os sistemas de comunicação através do olhar (figura 2.16). Estes aparelhos eletrónicos com autonomia são constituídos por óculos especiais, em cujas lentes se projeta um teclado virtual, dispondo ainda de sistemas de síntese de voz incorporados para a reprodução das palavras, selecionadas através do olhar.



Figura 2.16: Sistema de comunicação através do olhar EyeSpeak™ (LusoVU) (<http://www.myeyespeak.com/>) (LusoVU, 2015) e óculos Epson®.

Recentemente foi desenvolvido o primeiro sensor mundial de sopro (*puff*) sem a necessidade do contacto com a boca, para multi-utilização em tecnologia assistiva (figura 2.17). Este tipo de sensor permite, por exemplo, a emulação dos botões do rato no computador por utilizadores humanos com necessidades especiais, através do assopro ou da aspiração. Até agora, esta tecnologia utilizava um tubo ligado a um bucal, solução que apresentava diversos inconvenientes derivados do surgimento de bactérias, e que exigia a substituição regular do bucal e do tubo de ar de ligação ao sensor. Esta nova tecnologia possibilita a remoção do bucal, facilitando a interação do dispositivo com o utilizador, permitindo ainda aumentar a segurança e diminuir os tempos de execução das tarefas, no acesso ao computador e a dispositivos móveis como *tablets* e *smartphones*.



Figura 2.17: Sensor de sopro sem contacto Quha Sento™ MP (<http://www.quha.com/wp-content/uploads/2016/09/Quha-Sento-MP-04-1024x1024.jpg>) (Quha, 2016).

Para a assistência aos utilizadores invisuais foram desenvolvidos recentemente alguns dispositivos inovadores, como óculos de reconhecimento visual com Realidade Aumentada (AR) e tecnologia com Sistema de Posicionamento Global (GPS), dispositivos vestíveis para deteção de cores (Rashid et al., 2016), interfaces alternativas em Braille (Gupta & Kumar, 2016), equipamentos eletrónicos de Reconhecimento Ótico de Caracteres (OCR) (Liu et al., 2016; Lusa, 2018) e aplicações de visão para *smartphones* que possibilitam a deteção de faixas previamente assinaladas para a realização de percursos, entre outros.

## 2.5 Alguns projetos em curso sobre fatores humanos

A pesquisa sobre os fatores humanos, ligada às neurotecnologias, tem também despertado recentemente um elevado interesse. A iniciativa americana BRAIN® (*The Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies*) (Bargmann et al., 2014), tem como objetivo o desenvolvimento de tecnologias inovadoras na área das ciências da cognição. Inspirada pelo projeto do genoma humano, a iniciativa BRAIN®<sup>6</sup> irá contribuir para uma melhor compreensão do cérebro humano. Há pouco tempo a União Europeia acordou também um investimento de mais de um bilião de euros no Projeto Cérebro Humano (HBP), que envolverá um consórcio com a participação de diversas instituições internacionais e irá permitir um forte estímulo científico no sentido de criar a simulação do funcionamento do cérebro humano com recurso a supercomputadores. Os principais objetivos associados ao Projeto Cérebro Humano são:

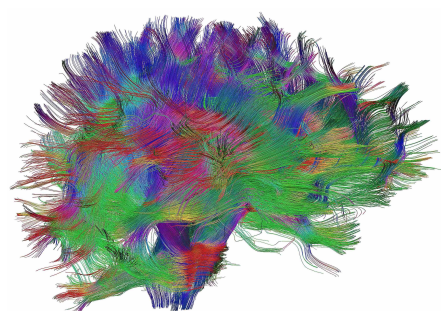
- Criar e operar uma infraestrutura de investigação científica europeia para o cérebro, para a neurociência cognitiva e para outras ciências inspiradas no cérebro.
- Reunir, organizar e disseminar dados, descrevendo o cérebro e as suas doenças.
- Simular o cérebro.
- Construir as bases da teoria e dos modelos do cérebro.
- Desenvolver a computação inspirada no cérebro, a análise de dados e a robótica.
- Assegurar que o trabalho levado a cabo no Projeto Cérebro Humano empreende responsabilidade e beneficia a sociedade.

---

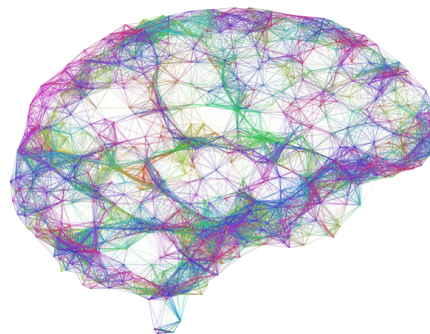
<sup>6</sup> <http://www.braininitiative.org/>.



O Projeto Cérebro Humano <sup>7</sup> irá decorrer durante o período de 2013 a 2023. Conta com a participação de investigadores do Programa Champalimaud de Neurociências <sup>8</sup>, que irão contribuir para o desenvolvimento de modelos computacionais, os quais pretendem permitir compreender a complexidade das estruturas nervosas (figuras 2.18.a e 2.18.b) existentes no cérebro humano.



(a) Imagem por Tensor de Difusão (DTI) das fibras nervosas existentes na substância branca do cérebro.



(b) Ilustração da rede neuronal do cérebro, representada por pontos e linhas.

Figura 2.18: (a) Imagem por Tensor de Difusão <sup>9</sup> das fibras nervosas presentes na substância branca do cérebro humano; (b) rede neuronal do cérebro humano. Imagens adaptadas de Science Photo Library <sup>10</sup>.

A empresa Neuralink™ <sup>11</sup>, recentemente criada, pretende produzir e comercializar implantes cérebro-computador com ultra alta largura de banda. O projeto ligado a esta empresa, apresentado em Março de 2017 e cofundado por Elon Musk <sup>12</sup>, tem por objetivo ligar os cérebros humanos aos computadores, desenvolvendo ciborgues.

A quarta Revolução Industrial resulta agora da integração dos sistemas de produção inovadores e das tecnologias avançadas de informação. O conceito de Manufatura Aditiva (AM) (Calignano et al., 2017; Dilberoglu et al., 2017; Meboldt & Klahn, 2018) é considerado o novo paradigma da “Indústria 4.0”.

No capítulo 3 são apresentados os contributos teóricos, as metodologias e, em suma, o esforço de investigação realizado tendo em vista a modelagem, a identificação, o controlo de sistemas humano-máquina e a melhoria do desempenho, tomando como linhas de inspiração alguns dos conceitos aqui descritos.

<sup>7</sup> <https://www.humanbrainproject.eu/en/>.

<sup>8</sup> <http://www.neuro.fchampalimaud.org/en/about-us/vision/cnp-vision/>.

<sup>9</sup> Técnica não intrusiva, que estima o movimento das moléculas de água nos tecidos fibrosos cerebrais.

<sup>10</sup> <http://www.sciencephoto.com/>.

<sup>11</sup> <https://www.neuralink.com/>.

<sup>12</sup> Fundador da empresa SpaceX™ (<https://www.spacex.com/>), cofundador das empresas Tesla Motors™ (<https://www.tesla.com/>) e PayPal™ (<https://www.paypal.com/>), e presidente da subsidiária SolarCity™ (<https://www.tesla.com/solarroof/>).

Página em branco

## Capítulo 3

# Modelagem, identificação e controlo de sistemas HMI

*Não se pode ignorar o sentimento que as fórmulas matemáticas têm uma existência independente e uma inteligência próprias e são mais sábias do que nós.*

Heinrich Hertz (1857 - 1894)

### Sumário

3.1	Introdução . . . . .	31
3.2	Modelagem de sistemas de interação humano-máquina . . . . .	32
3.3	Identificação de sistemas de interação humano-máquina . . . . .	40
3.4	Projeto de controladores com integração do humano . . . . .	50
3.5	Análise de desempenho dos sistemas humano-máquina . . . . .	64

### Resumo

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos e as técnicas de modelagem e de identificação para os sistemas de interação humano-máquina utilizados, sendo descritas as metodologias de controlo com a integração do operador humano e as técnicas propostas de transferência de conhecimento. São ainda abordadas as ferramentas de projeto de controladores de assistência para sistemas humano-máquina, sendo introduzidas diversas medidas e modelos para a análise de desempenho.

### 3.1 Introdução

O principal objetivo deste trabalho centra-se no projeto de controladores para melhorar o desempenho dos sistemas humano-máquina. Para cumprir este propósito, é ainda necessário efetuar a modelagem e a identificação do sistema a controlar. Embora a resposta de um dado sistema humano-máquina nem sempre apresente comportamento linear, existem diversos estudos que revelaram que os modelos lineares e quase-lineares podem ser utilizados para captar o comportamento

relevante de um sistema humano-máquina, nomeadamente quando estejam em causa tarefas manuais simples (Antunes et al., 2013a; Antunes et al., 2010b; Gaines, 1969; Gray, 2007; Jackson, 1969; Palma et al., 2012; Pool et al., 2009; Potter & Singhose, 2013; Ragazzini, 1948; Sheridan & Ferrell, 1975; Tervo & Manninen, 2010; Tustin, 1947). Assim, é permitido o recurso às técnicas clássicas de controlo combinadas com outras abordagens mais recentes, como por exemplo o controlo supervisionado, a transferência de aprendizagem/conhecimento e os algoritmos evolutivos.

Dois aspetos importantes acerca da modelagem e da identificação dos comportamentos do operador humano e do sistema humano-máquina, em que este se integra, devem no entanto ser tomados em consideração:

- O operador humano constitui um sistema complexo não linear e variante no tempo, devido ao seu comportamento depender simultaneamente de diferentes fatores, tanto pessoais (a concentração, o treino e a aprendizagem ou a condição física), como ambientais (as perturbações ou o conforto). Como tal, este comportamento não poderá à partida ser completamente capturado através de um simples modelo dinâmico, ou mesmo de um conjunto destes modelos (Abdel-Malek & Marmarelis, 1988; Imamizu et al., 2000). O propósito dos modelos a desenvolver não será replicar completamente o comportamento humano, mas sim conseguir extrair a informação relevante para o poder caracterizar.
- A aplicação de técnicas de identificação em sistemas que integram o humano no anel de controlo constitui, à partida, um problema de elevada complexidade (Tervo & Manninen, 2010), já que em qualquer experiência com o ser humano e a máquina, o operador humano fecha a “ponte” entre sentir e atuar. Assim, para se poder obter um modelo aceitável desse sistema resultante, torna-se necessário extraí-lo primeiro através dos dados experimentais obtidos em anel fechado.

### **3.2 Modelagem de sistemas de interação humano-máquina**

A ideia subjacente à modelagem e identificação de um sistema humano-máquina será encontrar o modelo mais simples possível que, apesar da sua simplicidade, consiga ainda assim abarcar as características mais relevantes acerca do seu comportamento (Antunes et al., 2010b). Podem ser utilizadas diversas metodologias para a obtenção de um modelo Linear Invariante no Tempo (LTI), principalmente quando estejam em causa tarefas manuais simples. Os modelos lineares podem ser diretamente obtidos por modelagem físico-matemática ou através de técnicas de identificação de sistemas (Ljung, 1998).

Tendo em conta a integração do operador humano, este trabalho é dirigido para o problema da identificação de sistemas, ou seja, como estimar um sistema humano-máquina a partir da observação dos dados de entrada/saída. Os métodos paramétricos de identificação são técnicas para estimação de parâmetros em estruturas de modelos predefinidas, através da procura, por busca numérica, dos valores dos parâmetros que minimizam as diferenças entre a saída do modelo e os dados medidos. Nestes métodos inclui-se a estimação de modelos ARX para modelar a dinâmica

do sistema humano-máquina, enquanto que os métodos de identificação não paramétricos permitem obter o comportamento de um sistema sem a necessidade de um modelo parametrizado com uma estrutura predefinida.

Diversos estudos (Antunes et al., 2010a; Kawato, 2009; Samejima et al., 2006) revelaram a existência de multi-modelos em processos de identificação para um mesmo operador durante a realização de certas tarefas de seguimento, pelo que, o comportamento relevante de um dado sistema humano-máquina pode não ser suficientemente sintetizado em alguns tipos de experiências através de um único modelo Linear Invariante no Tempo, dependendo esse comportamento do padrão das tarefas envolvidas para um mesmo operador humano. Por exemplo, a uma tarefa de seguimento manual mais rápida corresponderá um modelo distinto do obtido para a execução de uma tarefa de seguimento mais lenta.

Atendendo à existência de múltiplos modelos na identificação do comportamento para um mesmo indivíduo, e estando neste caso os modelos dependentes das gamas de frequências do sinal de seguimento utilizado, torna-se interessante desenvolver metodologias de classificação dos sinais de controlo humano-máquina, nomeadamente em termos da sua gama de frequências (subsecção 3.2.1).

### 3.2.1 Modelo para classificação de bandas de frequências

As técnicas utilizadas para a classificação de sinais de diferentes bandas de frequências que empregam filtros analógicos ou digitais são normalmente dependentes do padrão do sinal a classificar, da sua amplitude e do ruído, tendo esses filtros de ser redimensionados quando são alteradas as frequências dos sinais a classificar. Atendendo a este facto, concebeu-se um modelo alternativo de classificação de sinais, baseado na percepção humana, cujo diagrama conceptual é ilustrado na figura 3.1, através da introdução de uma estrutura neuronal com duas camadas, capaz de distinguir sinais de seguimento de alta e de baixa frequência <sup>1</sup>,

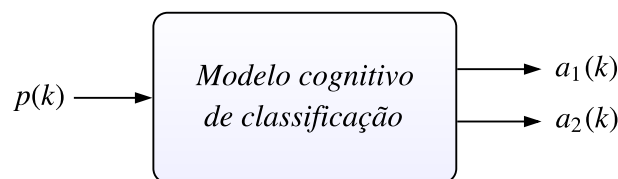


Figura 3.1: Diagrama conceptual do modelo de classificação de sinais em gamas de frequências, baseado na percepção humana.

onde  $p(k)$  representa o sinal de entrada a classificar e  $a_1(k)$  e  $a_2(k)$  as saídas binárias de classificação, correspondentes às gamas de frequências 1 e 2.

As Redes Neurais Artificiais (ANNs) (Demuth & Beale, 1998; Haykin, 2009; Silva et al., 2017) são inspiradas a partir dos sistemas biológicos nervosos como o cérebro humano (com axónios, dendrites, núcleos e sinapses) (figuras 3.2.a e 2.18.b), sendo estes constituídos por simples

<sup>1</sup> Considerando apenas duas saídas discretas,  $a_1(k)$  e  $a_2(k)$ , na configuração mais elementar do modelo de classificação.

elementos operando em paralelo. Na figura 3.2.b é apresentada a estrutura de um neurónio artificial genérico, onde  $p_i$  representa a entrada  $i$  e  $w_{1,i}$  o seu correspondente peso. A função  $f(n)$  é designada função de ativação do neurónio. As entradas para um neurónio artificial genérico incluem a entrada de polaridade  $b$  (*bias*) e a soma dos pesos das suas entradas, de acordo com (3.1) e (3.2).

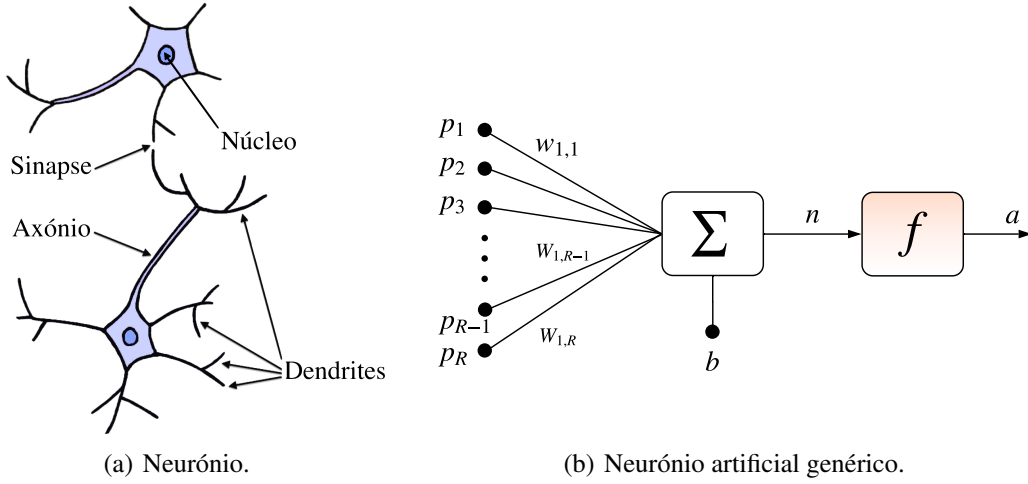


Figura 3.2: (a) Neurónio; (b) representação de um neurónio artificial genérico.

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & w_{1,3} & \cdots & w_{1,R} \end{bmatrix} \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \vdots \\ p_R \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + w_{1,3}p_3 + \dots + w_{1,R}p_R + b = \mathbf{wp} + b \quad (3.2)$$

A resposta de saída  $a$  do neurónio artificial (3.3) irá depender das suas entradas e pesos, e ainda da sua função de ativação  $f(n)$ , pelo que

$$a = f(n) = f(\mathbf{wp} + b) \quad (3.3)$$

Outros neurónios podem também ser combinados em uma ou mais camadas, formando uma Rede Neuronal Artificial (ANN) mais ou menos complexa. Deste modo, a estrutura neuronal correspondente poderá ser definida através da representação matemática do número total de camadas, do número de neurónios em cada camada (e suas funções de ativação), e ainda, da forma como essas camadas são interligadas.

### 3.2.1.1 Rede com entradas sequenciais

Quando uma rede neuronal não possui retroações ou atrasos as suas entradas são concorrentes, não importando pois se estas ocorrem numa dada sequência particular. As técnicas de treino

incremental e em série podem ser realizadas neste tipo de rede ou em redes cuja entrada da rede é uma sequência de vetores de entrada, numa dada ordem de tempo. A utilização de uma Linha de Atraso (TDL) numa rede de entradas sequenciais com um único neurónio é apresentada na figura 3.3.

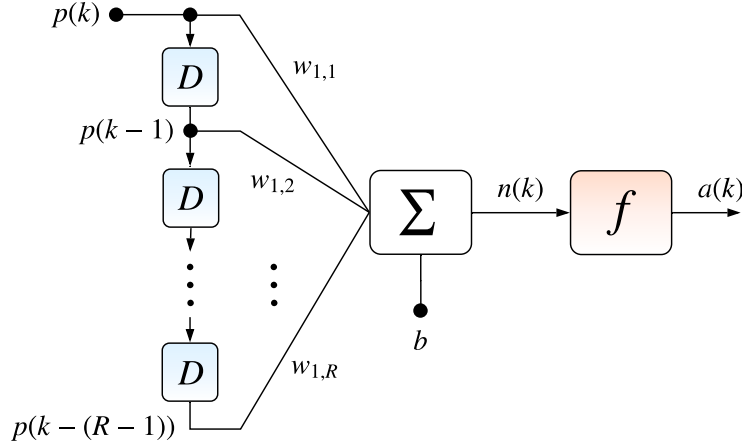


Figura 3.3: Rede genérica com  $R$  entradas sequenciais, constituída por um único neurónio e por  $(R - 1)$  atrasos  $D$ .

A saída da Linha de Atraso é um vetor de dimensão  $R$ , constituído pelo sinal de entrada  $p(k)$  atual e ainda pelo conjunto dos sinais de entrada anteriores  $\{p(k - 1), p(k - 2), \dots, p(k - R + 1)\}$  (3.4). Este tipo de estrutura com Linha de Atraso, quando combinada com uma função linear de ativação  $f(n)$ , corresponde a um filtro digital de Resposta ao Impulso Finita (FIR), escrevendo-se

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p(k) \\ p(k-1) \\ p(k-2) \\ \vdots \\ p(k-(R-1)) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Tendo em conta (3.3), a saída  $a(k)$  da rede neuronal da figura 3.3 para o domínio discreto é obtida por

$$a(k) = f(\mathbf{w}\mathbf{p} + b) = f\left(\sum_{i=1}^R (w_{1,i} p(k-i+1)) + b\right) \quad (3.5)$$

### 3.2.1.2 Rede com múltiplos neurónios

Uma Rede Neuronal Artificial poderá possuir mais do que um neurónio, e nesse caso a Linha de Atraso poderá ser utilizada com um conjunto de  $E$  neurónios presentes, conforme ilustrado na figura 3.4

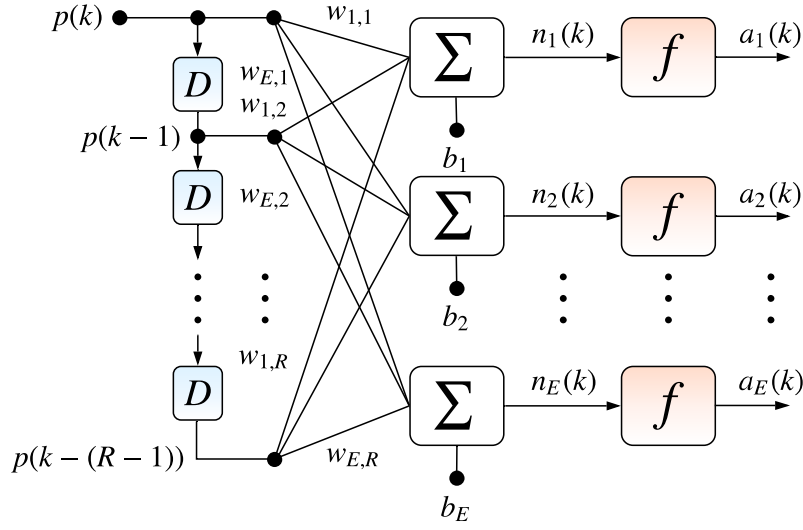


Figura 3.4: Camada de uma rede neuronal com múltiplos neurónios genéricos.

e

$$\mathbf{W}_{L_m, L_{m-1}} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \cdots & w_{2,R} \\ w_{3,1} & w_{3,2} & \cdots & w_{3,R} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{E,1} & w_{E,2} & \cdots & w_{E,R} \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}_{L_m} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_E \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

A rede neuronal ((3.6) e figura 3.4) pode também ser constituída por uma ou mais destas camadas. Para uma dada camada  $L_m$ , o vetor correspondente  $\mathbf{a}_{L_m}(k)$  dos sinais de saída  $a_{L_m,j}(k)$  da rede é definido em (3.8), (3.5) e (3.7), sendo  $p(k)$  o sinal de entrada da camada  $L_m$ .

$$a_{L_m,j}(k) = f_{L_m} \left( \sum_{i=1}^R (w_{L_m, L_{m-1}, j, i} p(k-i+1)) + b_{L_m,j} \right) \quad (3.7)$$

$$\mathbf{a}_{L_m}(k) = \begin{cases} f_{L_m}(\mathbf{W}_{L_m, L_{m-1}} \mathbf{p} + \mathbf{b}_{L_m}) & \text{se } m > 1 \\ f_{L_1}(\mathbf{W}_{L_1, L_1} \mathbf{p} + \mathbf{b}_{L_1}) & \text{se } m = 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

### 3.2.1.3 Modelo da rede neuronal

A estrutura proposta para a Rede Neuronal Artificial de duas camadas ( $\{1\}$  e  $\{2\}$ ) para a classificação de sinais de duas diferentes bandas de frequências, é ilustrada na figura 3.5. Esta rede possui um atraso na primeira camada e dez atrasos na segunda camada, gerando respetivamente,  $p(k-1)$  e  $\{u(k-1), \dots, u(k-10)\}$ . A função de ativação de Heaviside presente na segunda camada  $\{2\}$  faz com que a rede neuronal produza apenas valores digitais (de “0” ou “1”) nas suas saídas de ativação, de acordo com (3.20), (3.21), (3.22), (3.23) e (3.24). Convém no entanto salientar que as camadas de neurónios com funções de ativação não lineares, como a primeira camada  $\{1\}$ , irão ainda assim permitir que a Rede Neuronal Artificial possa efetuar o seu procedimento de aprendizagem e de treino através de relações lineares e não lineares.



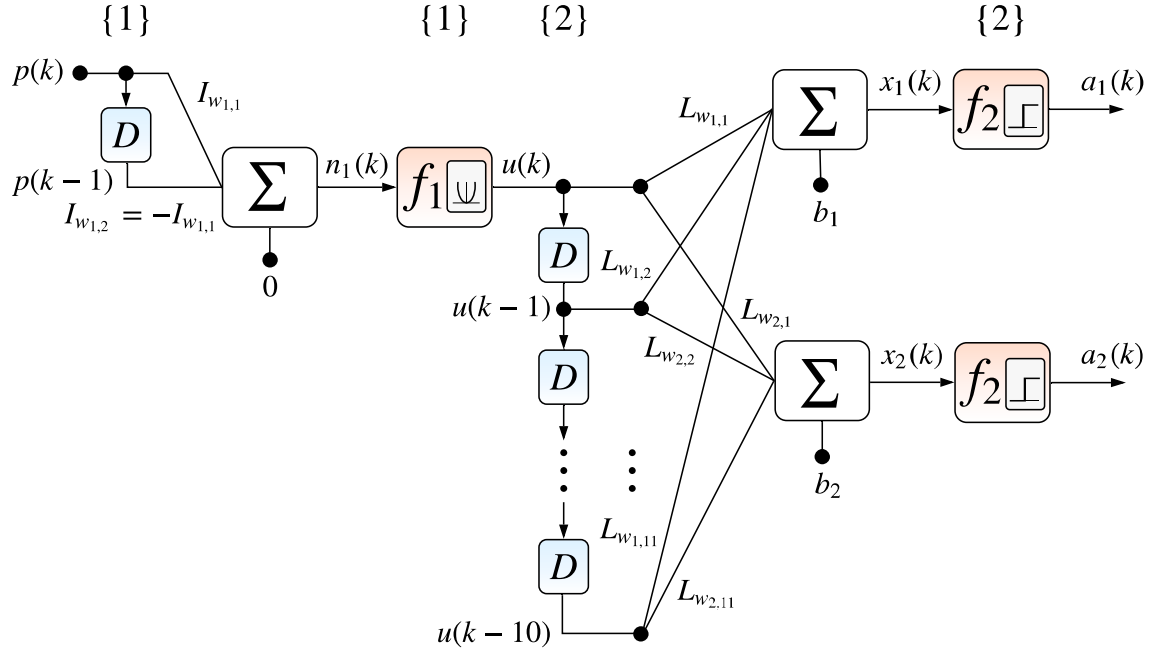


Figura 3.5: Estrutura da rede neuronal de duas camadas proposta, para a classificação binária de sinais com diferentes gamas de frequências (Antunes & Coito, 2008).

É proposto um modelo neuronal por alimentação direta para a classificação de sinais com diferentes bandas de frequências, inspirado numa abordagem de percepção (Antunes & Coito, 2008), que inicialmente começa por amplificar as altas frequências através da introdução do operador de derivação, por forma a alargar a separação dos dados em termos de frequência, para efeitos de classificação. A entrada  $n_1(t)$  da função de ativação do primeiro neurónio artificial é assim obtida em tempo contínuo por

$$n_1(t) = C_0 \frac{d}{dt} p(t) \quad (3.9)$$

e para o domínio do tempo discreto (3.9) virá

$$n_1(k) = Iw_{1,1}(p(k) - p(k-1)) \quad (3.10)$$

correspondendo (3.10) a (3.11), se se tiver em consideração (3.12), sendo  $T_s$  o período de amostragem.

$$n_1(k) = Iw_{1,1}p(k) + Iw_{1,2}p(k-1) + b_{L11} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} Iw_{1,2} = -Iw_{1,1} = -\frac{C_0}{T_s} \\ b_{L11} = 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

#### 3.2.1.4 Camada de entrada

O primeiro neurónio da rede irá funcionar como um derivador em linha, sendo capaz de amplificar as altas frequências. Tendo em conta que na percepção visual não interessará à partida se o sinal da saída é positivo ou negativo, propõe-se uma função não linear de ativação  $f_1$  – a função quadrática

(figura 3.5), capaz de amplificar ainda mais a saída do derivador, tornando-a também sempre positiva. Atendendo ao pressuposto de que a percepção visual dos sinais de alta frequência tende a ampliar o padrão associado ao valor absoluto das altas variações, de forma a distingui-las mais facilmente, a saída  $a_{L_{11}}(k)$  da primeira camada pode ser expressa por

$$a_{L_{11}}(k) = f_{L_1}(n_{L_{11}}(k)) = (n_1(k))^2 \quad (3.13)$$

resultando (3.13) em

$$a_{L_{11}}(k) = (Iw_{1,1})^2(p(k) - p(k-1))^2 = u(k) \quad (3.14)$$

### 3.2.1.5 Camada de saída

Assume-se agora a operação de integração e de limitação para o sinal de saída previamente amplificado (3.14), sendo proposta para a rede uma camada adicional constituída por dois neurónios. A função de ativação  $f_2$  utilizada é a função de Heaviside (*hardlim*), que retorna “0” ou “1” consoante a entrada seja menor do que 0 ou maior ou igual a 0. Consideram-se ainda dois valores fixos, a ajustar para as entradas de polaridade  $b_1$  e  $b_2$ , consoante a classificação respetiva de alta ou de baixa frequência. Para o domínio contínuo, as duas saídas do integrador são definidas por

$$x_1(t) = C_1 \int_{t_0}^t u(t)dt + b_1 \quad (3.15)$$

$$x_2(t) = C_2 \int_{t_0}^t u(t)dt + b_2 \quad (3.16)$$

Tendo em conta (3.15) e (3.16), as saídas  $x_1(k)$  e  $x_2(k)$  do integrador (figura 3.5) para o domínio do tempo discreto são obtidas por

$$x_1(k) = \sum_{i=1}^R (Lw_{1,i}u(k-i+1)) + b_1 \quad (3.17)$$

$$x_2(k) = \sum_{i=1}^R (Lw_{2,i}u(k-i+1)) + b_2 \quad (3.18)$$

com

$$t - t_0 = \frac{R}{F_s} \quad (3.19)$$

sendo  $F_s$  a frequência de amostragem.

De (3.17) e de (3.18) resulta, para cada saída  $a_j(k)$

$$a_j(k) = f_{L_2}(x_j(k)) = f_{L_2}\left(\sum_{i=1}^R (Lw_{j,i}u(k-i+1)) + b_j\right) \quad (3.20)$$

Como

$$a_j(k) = \text{hardlim}(x_j(k)) \quad (3.21)$$

virá

$$a_{j=1,2}(k) = \begin{cases} 1 & \text{se } \sum_{i=1}^R (Lw_{j,i}u(k-i+1)) + b_j \geq 0 \\ 0 & \text{se } \sum_{i=1}^R (Lw_{j,i}u(k-i+1)) + b_j < 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

Assumindo uma condição simétrica entre as altas e as baixas frequências, pode admitir-se que a relação de ganho do integrador seja simplesmente

$$C_1 = -C_2 \quad (3.23)$$

da qual resultará

$$Lw_{1,i} = -Lw_{2,i} \quad i = 1 \dots R \quad i \in \mathbb{N}^+ \quad (3.24)$$

O processo de identificação e de treino da rede é descrito em detalhe na subsecção 3.3.1 e no capítulo 4 (secção 4.2).

### 3.2.2 Modelagem ARX

Os Modelos Auto-Regressivos com Entradas Exógenas (ARX) (Ljung, 1998) são utilizados para a identificação de sistemas lineares, devido ao seu elevado potencial e à sua simplicidade. A estrutura ARX mais comum corresponde a uma equação linear às diferenças definida por

$$y(k) + a_1y(k-1) + \dots + a_nay(k-na) = b_1u(k-nd) + \dots + b_nbu(k-nd-nb+1) + e(k) \quad (3.25)$$

onde a saída presente  $y(k)$  do Modelo Auto-Regressivo com Entradas Exógenas está relacionada com um número de entradas e de saídas passadas,  $na$  iguala o número de polos e  $(nb-1)$  iguala o número de zeros, sendo  $nd$  o atraso inerente do sistema em número de amostras e  $e(k)$  o erro do modelo associado ao ruído. A equação às diferenças (3.25) pode ser escrita na forma de preditor em (3.26), (3.27) e (3.28), desprezando o erro de modelagem  $e(k)$  e considerando o operador atraso  $q$ :

$$A(q)y(k) = B(q)u(k-nd) \quad (3.26)$$

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_naq^{-na} \quad (3.27)$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_nbq^{-nb+1} \quad (3.28)$$

Os métodos de estimação de parâmetros normalmente utilizados para a obtenção dos vetores  $\mathbf{a}_{\text{ARX}} = [a_1 \dots a_{na}]$ ,  $\mathbf{b}_{\text{ARX}} = [b_1 \dots b_{nb}]$  e do atraso puro  $nd$  são referenciados na subsecção 3.3.3, assim como o procedimento para a escolha da frequência de amostragem  $F_s$  e do atraso amostral  $nd$ .

### 3.2.3 Modelagem baseada em função de transferência

A função de transferência  $F(z)$  em tempo discreto, admitindo  $q = z$ , é obtida por (3.29), aplicando a transformada Z a (3.26):

$$F(z) = \frac{z^{-nd}B(z)}{A(z)} \quad (3.29)$$

Para tempo contínuo, a função de transferência  $F(s)$  é expressa na forma geral por

$$F(s) = \frac{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_0}{a_ns^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_0} e^{-\tau s} = \frac{B(s)}{A(s)} e^{-\tau s} \quad n \geq m \quad (3.30)$$

sendo  $\tau$  o atraso puro do sistema associado à operação,  $n$  o número de polos e  $m$  o número de zeros (3.30).

As metodologias de modelagem até agora descritas são ainda assim limitadas, necessitando de validação adicional. Outra técnica para a obtenção de modelos de sistemas com o Humano Integrado no Anel de controlo é a baseada na resposta em frequência, ou seja, em como um sistema dinâmico linear irá reagir na presença de certos sinais sinusoidais de referência. Uma técnica de identificação proposta para a obtenção de uma função de transferência que caracterize o sistema humano-máquina, baseada no método melhorado de análise em frequência, é descrita em pormenor na subsecção 3.3.5.

## 3.3 Identificação de sistemas de interação humano-máquina

Nesta secção abordam-se as técnicas de identificação dos modelos de sinais e dos modelos de sistemas descritos na secção 3.2.

### 3.3.1 Identificação do modelo para classificação de frequências

A identificação do modelo proposto para a classificação de diferentes gamas de frequências recorre ao treino supervisionado.

#### 3.3.1.1 Algoritmo de aprendizagem por Mínimos Quadrados Médios

O algoritmo adaptado de aprendizagem por Mínimos Quadrados Médios (LMS) de Widrow-Hoff baseia-se numa regra de aprendizagem dos pesos e das entradas de polaridade através de Mínimos Quadrados, tendo agora em conta a função quadrática de ativação  $f_1$  e a função de ativação de Heaviside  $f_2$  da rede neuronal (figura 3.5). Para o treino da rede recorre-se a um método de aproximação à direção do gradiente (negativo) mais íngreme, conforme mostrado no algoritmo 3.1, tendo como objetivo minimizar o erro quadrático médio entre cada saída da rede e o alvo de saída pretendido.

Os vetores  $b$  e  $g$  são, respetivamente, a entrada de polaridade e o vetor de erro, sendo  $l_r$  a taxa de aprendizagem. Este processo de aprendizagem pode ser acelerado se a taxa de aprendizagem for mais elevada. No entanto, se o valor de  $l_r$  for demasiado elevado, o treino da rede poderá levar a um aumento do erro, dando origem a um processo de aprendizagem instável.

---

 Algoritmo 3.1: Aprendizagem por Mínimos Quadrados Médios (Demuth & Beale, 1998).
 

---

- 1:  $\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) + 2l_r \mathbf{g}(k) \mathbf{p}^T(k)$
  - 2:  $\mathbf{b}(k+1) = \mathbf{b}(k) + 2l_r \mathbf{g}(k)$
- 

Embora as funções de ativação da estrutura da Rede Neuronal Artificial (ANN) apresentem características não lineares, o algoritmo de aprendizagem por Mínimos Quadrados Médios (LMS) mostrou, ainda assim, ser um método de convergência para certas taxas de aprendizagem  $l_r$ , conforme evidencia a análise dos resultados de classificação de frequências efetuada no capítulo 4 (secção 4.2).

### 3.3.2 Análise da resposta transiente

As propriedades dinâmicas de um dado modelo linear podem ser investigadas analisando a sua resposta transiente. Os atrasos de tempo, as constantes e o ganho estático do sistema humano-máquina podem, por exemplo, ser calculados a partir dos dados experimentais das respostas desse sistema ao degrau e ao impulso. A identificação de modelos lineares de baixa ordem pode também ser facilmente confirmada através da análise da resposta transiente.

#### 3.3.2.1 Resposta ao degrau

Admita-se um sistema Linear Invariante no Tempo (LTI) definido pela função de transferência  $Q(s) = H(s)M(s)$ , que agrega as características associadas ao operador humano  $H(s)$  e à máquina  $M(s)$ . A figura 3.6 ilustra uma representação simplificada desse sistema humano-máquina resultante com retroação,

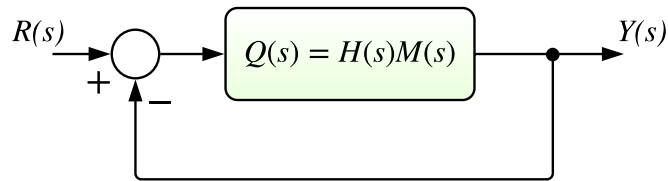


Figura 3.6: Representação simplificada para o domínio da frequência do sistema humano-máquina em anel fechado.

em que  $R(s)$  e  $Y(s)$  correspondem respetivamente aos sinais de entrada e de saída no domínio da frequência. A função de transferência  $G(s)$  do sistema resultante com retroação é dada por

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{H(s)M(s)}{1 + H(s)M(s)} \quad (3.31)$$

A resposta  $Y(s)$  de (3.31) para uma entrada em forma de degrau unitário ( $R(s) = 1/s$ ) pode ser fatorizada em termos de segunda e de primeira ordem (3.32), admitindo polos reais e pares de

polos complexos conjugados:

$$Y(s) = \frac{1}{s} \left( \frac{k_e \prod_{k=1}^n (s + v_k)}{\prod_{i=1}^r (s + p_i) \prod_{u=1}^m (s^2 + 2\zeta_u \omega_u s + \omega_u^2)} \right) \quad (3.32)$$

Considerando polos distintos, o desenvolvimento em frações parciais (Ogata, 2010) será

$$Y(s) = \frac{a}{s} + \sum_{i=1}^r \frac{a_i}{s + p_i} + \sum_{u=1}^m \frac{b_u (s + \zeta_u \omega_u) + c_u \omega_u \sqrt{1 - \zeta_u^2}}{s^2 + 2\zeta_u \omega_u s + \omega_u^2} \quad (3.33)$$

pelo que a resposta ao degrau do sistema genérico, Linear Invariante no Tempo, poderá ser descrita em termos de funções mais simples, que correspondem a sistemas de segunda e de primeira ordem. Por aplicação da transformada inversa de Laplace a (3.33), a resposta  $y(t)$  ao degrau unitário  $r(t)$  será dada por

$$y(t) = a + \sum_{i=1}^r a_i e^{-p_i t} + \sum_{u=1}^m b_u e^{-\zeta_u \omega_u t} \cos \left( \omega_u \sqrt{1 - \zeta_u^2} t \right) + \sum_{u=1}^m c_u e^{-\zeta_u \omega_u t} \sin \left( \omega_u \sqrt{1 - \zeta_u^2} t \right) \quad (3.34)$$

Se os polos de  $Y(s)$  se localizarem no semi-plano complexo esquerdo, então todos os termos amortecidos tenderão ao longo do tempo para zero, sendo  $\lim_{t \rightarrow +\infty} y(t) = 1$ . Os termos de (3.34) que decaem mais rapidamente para zero correspondem aos polos cujo módulo da sua parte real (negativa) é maior.

### 3.3.2.2 Resposta ao impulso

Qualquer sistema Linear Invariante no Tempo pode ser caracterizado através da sua resposta ao impulso. Geralmente, é mais fácil modelar um sistema no domínio da frequência, ou seja, através de uma função de transferência que corresponde à transformada de Laplace da resposta  $h(t)$  relativa ao impulso. Para se obter diretamente a saída temporal do sistema para uma dada entrada, terá de ser efetuada a convolução  $(*)$  do sinal de entrada com a resposta do sistema ao impulso. Sendo conhecida ou determinável a função de transferência <sup>2</sup> e a transformada de Laplace do sinal de entrada, é normalmente mais fácil efetuar a multiplicação de duas funções de transferência no domínio da frequência e de seguida recorrer à transformada inversa de Laplace para se obter a resposta do sistema no domínio do tempo. A resposta  $h(t)$  do sistema ao impulso pode ser assim considerada com sendo uma “função de influência” do sistema.

O impulso contínuo é definido através da função delta de Dirac  $\delta(t)$ . Na prática é impossível implementar experimentalmente  $\delta(t)$ , já que esta função traduz um impulso infinitamente elevado que compreende porções idênticas de todas as frequências de excitação. Um impulso aproximado

<sup>2</sup> Obtida através da transformada inversa de Laplace aplicada à resposta ao impulso do sistema Linear Invariante no Tempo.

$v(t)$  que satisfaça  $\int v(t)dt = 1$  pode, por exemplo, ser obtido por

$$v(t) = \begin{cases} 1/\vartheta & \text{se } 0 \leq t < \vartheta \\ 0 & \text{se } t \geq \vartheta \end{cases} \quad (3.35)$$

e se a largura  $\vartheta$  do impulso  $v(t)$  de (3.35) for suficientemente pequena face às restantes constantes de tempo envolvidas, o erro  $e(t) = h(t) - y(t)$  poderá ser desprezável, porque

$$e(t) = h(t) - \int_0^{\infty} h(\tau)v(t-\tau)d\tau = h(t) - \frac{1}{\vartheta} \int_{\max\{0, t-\vartheta\}}^t h(\tau)d\tau \approx 0 \quad (3.36)$$

Embora a análise da resposta ao impulso constitua um método de modelagem em anel aberto simples e rápido, este método acarreta algumas desvantagens, devidas normalmente à existência de não linearidades e da saturação aumentada.

### 3.3.3 Identificação de função de transferência

Nesta subsecção apresenta-se uma metodologia de identificação a partir da função de transferência em tempo discreto  $F(z)$  de um Modelo Auto-Regressivo com Entradas Exógenas (ARX), obtido através de dados experimentais. O objetivo da identificação da função de transferência  $F(s)$  (3.30) é conseguir estimar os parâmetros  $\mathbf{a} = [a_0 \cdots a_n]$ ,  $\mathbf{b} = [b_0 \cdots b_m]$  e o atraso puro  $\tau$ . Os métodos de estimação geralmente utilizados para a identificação de modelos ARX (3.29) são os métodos de Mínimos Quadrados (LS) (Ljung, 1998), de variáveis instrumentais (Söderström & Stoica, 1989) e o Filtro de Kalman (KF) (Kalman & Bucy, 1961; Kalman, 1960; Mosca, 1995). Convém salientar que na identificação de sistemas é importante a escolha adequada da frequência de amostragem. Uma amostragem demasiado rápida poderá resultar numa modelagem pobre, contudo a utilização de um valor diferente para o tempo de atraso poderá mascarar o comportamento do sistema.

A estratégia adotada para a obtenção de um modelo ARX a partir dos dados experimentais (Antunes et al., 2011) é apresentada no algoritmo 3.2. Para a identificação do modelo ARX de (3.25) recorre-se a realização de diversas tarefas manuais de seguimento durante um intervalo de tempo predefinido. O sinal de seguimento é normalmente filtrado através de um Filtro Passa-Baixo (LPF).

---

Algoritmo 3.2: Obtenção do tempo de atraso, da frequência de amostragem e do modelo ARX.

---

- 1: Os sinais são inicialmente amostrados a uma frequência de 100 Hz.
  - 2: Os primeiros 500 ms de cada teste de 120 s são desconsiderados, porque as amostras respetivas correspondem à resposta transiente do Filtro Passa-Baixo utilizado.
  - 3: Para cada escolha do tempo de atraso, os sinais são previamente decimados antes de um modelo ARX poder ser calculado através de Mínimos Quadrados (LS).
  - 4: Tomando como índice de desempenho o desvio quadrático entre a saída e o seu valor estimado, é escolhida a melhor combinação do tempo de atraso  $\tau$  e da frequência de amostragem  $F_s$ .
  - 5: Os modelos contínuos equivalentes do tempo de atraso e ARX são obtidos separadamente, sendo de seguida combinados num modelo único de tempo contínuo. Em Antunes et al. (2011) são testadas 28500 estruturas ARX.
-

### 3.3.4 Tempo de atraso

O tempo de atraso é um parâmetro importante a ter em conta na modelagem dos sistemas de interação humano-máquina, porque afeta diretamente o desempenho do operador. Embora o ser humano seja considerado um sistema não linear, diversos estudos realizados (Ragazzini, 1948), demonstraram que o comportamento do operador humano durante a execução de uma tarefa motora simples, poderá ser suficientemente caracterizado através do recurso a um modelo aproximado Linear Invariante no Tempo acrescentado de um tempo de atraso  $\tau$  finito<sup>3</sup>. O parâmetro relativo ao tempo de atraso  $\tau$  de (3.37) é também inerente à modelagem ARX, através do deslocamento  $nd$  da amostra (3.38), pelo que a estimação do atraso de um sistema linear ou quase-linear pode ser posteriormente validada através de um procedimento de identificação ARX.

$$G(s) = H(s)e^{-\tau s} = H(s) \left( 1 - \tau s + \frac{(\tau s)^2}{2!} - \frac{(\tau s)^3}{3!} + \frac{(\tau s)^4}{4!} - \dots \right) \quad (3.37)$$

$$G(z) = H(z)z^{-k} \quad \tau = nd T_s \quad (3.38)$$

A estimativa do tempo de atraso para a estrutura do Modelo Auto-Regressivo com Entradas Exógenas constitui um procedimento de identificação relevante. Se o sistema for invariante no tempo a estimação do tempo de atraso fica simplificada, podendo extrair-se  $\tau$  diretamente a partir dos dados das médias das respostas do sistema ao degrau e ao impulso. A normalidade dos dados de resposta transiente pode ser aferida através de gráficos *rankit*, utilizando a função MATLAB® *normplot()*. Também podem ser utilizados outros testes para a análise da normalidade da resposta transiente de um sistema, como o teste de normalidade de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) e o teste *omnibus* de D'Agostino-Pearson (Razali et al., 2012).

O preditor de Smith é um controlador preditivo que pode ser utilizado para os Sistemas Lineares Invariantes no Tempo que incluam um tempo de atraso puro. Para a estimação do atraso em sistemas variantes no tempo é proposta em Boer & Kenyon (1998) uma técnica de estimação do atraso para sistemas não estacionários baseada no Filtro de Kalman Estendido (EKF) e na interpolação bicúbica.

### 3.3.5 Identificação pelo método melhorado de análise em frequência

O método melhorado de análise em frequência (Söderström & Stoica, 1989) é um método de identificação não paramétrico que possibilita a obtenção de modelos lineares a partir dos dados recolhidos através de experiências de seguimento. Sendo este um método experimental não paramétrico de anel fechado, para se conseguirem obter as características dinâmicas relevantes de um sistema que integra o humano, terão os modelos obtidos de ser posteriormente convertidos para modelos em anel aberto.

<sup>3</sup> Como resultado das latências inerentes ao sistema nervoso central e neuromuscular, e de outros fatores humanos, ambientais e maquínicos.



### 3.3.5.1 Análise em frequência

Nesta subsubsecção descreve-se o procedimento de identificação que permite, com base neste método: a) obter a resposta em frequência do sistema humano-máquina, em anel fechado, da figura 3.6; b) obter um modelo humano-máquina em anel fechado; c) obter o modelo correspondente em anel aberto  $Q(s) = H(s)M(s)$ .

De acordo com Söderström & Stoica (1989), se  $x(t)$  for um sinal sinusoidal de entrada de um sistema genérico  $D(s)$  assintoticamente estável, definido por

$$x(t) = a \sin(\omega t) \quad (3.39)$$

então, no estado estacionário, a saída desse sistema será dada por

$$y(t) = b \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.40)$$

com

$$\varphi = \arg(D(j\omega)) \quad (3.41)$$

e

$$b = a |D(j\omega)| \quad (3.42)$$

No método melhorado de análise em frequência, um sinal de referência  $x(t)$  é previamente construído de forma a que possa ser seguido por um operador humano, sendo  $y(t)$  o sinal de resposta correspondente. O sinal  $x(t)$  para seguimento é previamente gerado a partir de um conjunto de sinusoides com frequências múltiplas, escolhidas de forma a cobrir a gama de frequências das tarefas do operador (Antunes et al., 2013a; Antunes et al., 2010a). Se  $x(t)$  for um sinal unidimensional normalizado com duração  $T$ , constituído a partir da soma de  $N_S$  sinusoides  $x_k(t)$  com  $k$  frequências múltiplas predefinidas, então,  $y(t)$  será a correspondente saída, conforme (3.44), para um sistema  $D(s)$  Linear Invariante no Tempo, que se admite assintoticamente estável. O sinal de entrada  $x(t)$  e o sinal de saída  $y(t)$  são definidos por

$$x(t) = x_0 + x_k(t) = x_0 + \sum_{k=1}^{N_S} a_k \sin(\omega_k t) \quad \text{máx.}\{|x(t)|\} = 1 \quad x(t = \{0, T\}) = x_0 \quad (3.43)$$

$$y(t) = y_0 + y_k(t) = y_0 + \sum_{k=1}^{N_S} b_k \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad (3.44)$$

$$T = \frac{2k\pi}{\omega_k} \quad \omega_k = \frac{2k\pi}{T} \quad k \in \mathbb{N}^+ \quad (3.45)$$

sendo  $\varphi_k$  o desfasamento do termo correspondente da saída para a frequência angular  $\omega_k$ . A resposta  $y_k(t)$  em cada frequência angular múltipla  $\omega_k$  obtém-se através do esquema de decomposição da figura 3.7, sendo respetivamente  $y_{C_k}(t)$  e  $y_{S_k}(t)$  (3.46 e 3.48) as decomposições ímpar e par da resposta de seguimento para a frequência angular de ordem  $k$  considerada (3.45).

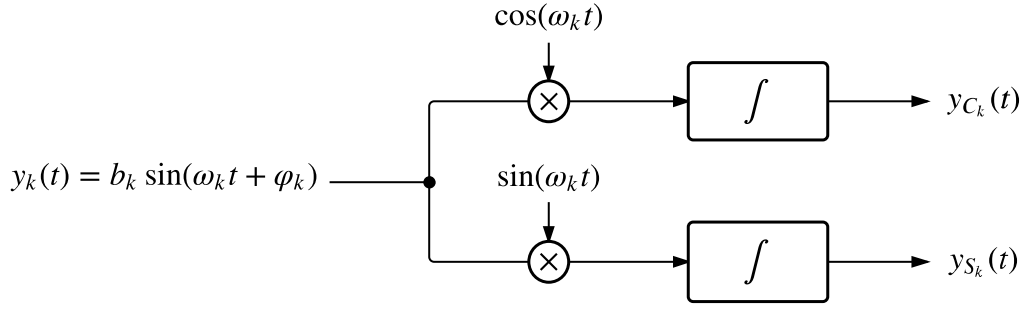


Figura 3.7: Diagrama de blocos do método melhorado de análise em frequência, para cada frequência angular múltipla  $\omega_k$ .

As decomposições do sinal de saída  $y_k(t)$  para as restantes frequências múltiplas são obtidas através do mesmo procedimento de decomposição (figura 3.7). Integrando ao longo do tempo  $T$ , resulta

$$y_{C_k}(T) = \int_0^T b_k \sin(\omega_k t + \varphi_k) \cos \omega_k t dt \quad (3.46)$$

$$y_{C_k}(T) = \frac{b_k T}{2} \sin \varphi_k \quad (3.47)$$

e

$$y_{S_k}(T) = \int_0^T b_k \sin(\omega_k t + \varphi_k) \sin \omega_k t dt \quad (3.48)$$

$$y_{S_k}(T) = \frac{b_k T}{2} \cos \varphi_k \quad (3.49)$$

A amplitude e a fase da resposta em frequência do sistema humano-máquina  $D(s)$  em anel fechado são obtidas respetivamente em (3.50) e (3.51), a partir de (3.47) e (3.49), sendo

$$b_k = \frac{2}{T} \sqrt{y_{C_k}^2(T) + y_{S_k}^2(T)} \quad a_k > 0 \quad (3.50)$$

e

$$\varphi_k = \arctan \left( \frac{y_{C_k}(T)}{y_{S_k}(T)} \right) \quad (3.51)$$

O ganho estático  $K_0$  é obtido por

$$K_0 = \frac{y_0}{x_0} \quad (3.52)$$

Atendendo ao facto de  $x_k(t)$  e de  $y_k(t)$  serem pares (3.43 e 3.44), para um sistema que se assume como Linear Invariante no Tempo, o ganho estático  $K_0$  pode ser calculado em (3.53) a partir do valor médio  $\bar{y}$  do sinal de saída de seguimento (3.52), dado que o valor do deslocamento inicial de  $x(t)$  é à partida conhecido ( $x_0$ ). O ganho estático  $K_0$  do sistema pode assim ser calculado através de

$$K_0 = \frac{\bar{y}}{x_0} \quad (3.53)$$

O sinal de seguimento de entrada  $x(t)$  de (3.43) é gerado a partir de um conjunto de frequências múltiplas, escolhidas de forma a poder cobrir a gama de frequências da operação. A gama típica de valores de frequência a utilizar nas tarefas de seguimento manual situa-se experimentalmente entre 0 Hz e 10 Hz. O sinal de seguimento deverá ser gerado de modo a evitar eventuais efeitos de aprendizagem <sup>4</sup>. É escolhida uma amplitude para cada frequência múltipla, assegurando a construção de um sinal de seguimento que cubra a gama espectral da operação. Este procedimento assegura que, apenas as frequências presentes no sinal de referência são tomadas em consideração para fins de modelagem. O modelo obtido irá caracterizar o comportamento em anel fechado do sistema humano-máquina. Na figura 3.8 é apresentada a amplitude para o domínio da frequência de um sinal unidimensional para seguimento. O sinal de seguimento de entrada e o sinal de saída correspondente para os primeiros 20 segundos da experiência de seguimento manual em perseguição são ilustrados na figura 3.9.

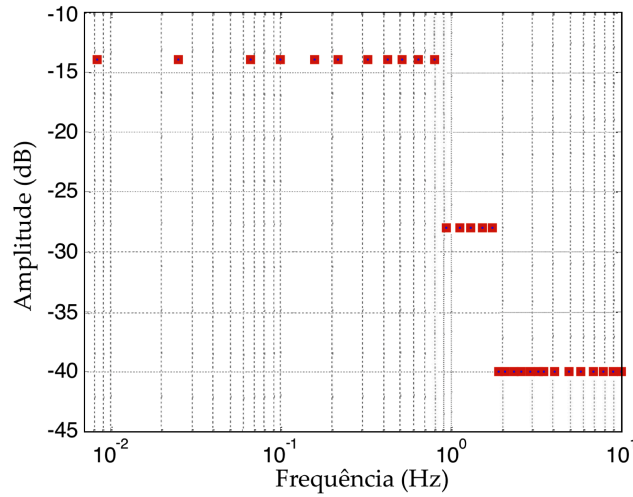


Figura 3.8: Espectro de amplitude de um sinal unidimensional para seguimento, gerado a partir da soma de 30 frequências múltiplas ( $N_S = 30$ ) compreendidas entre 0,0083 Hz e 10 Hz.

O movimento humano voluntário afeta a interação com a máquina porque o operador e a máquina formam em conjunto um sistema em anel fechado (3.54). Como tal, o modelo que caracteriza o sistema humano-máquina  $Q(s) = H(s)M(s)$  para anel aberto terá de ser inicialmente extraído a partir dos dados obtidos em anel fechado, conforme

$$D(s) = \frac{Q(s)}{1 + Q(s)} \quad (3.54)$$

$$Q(s) = \frac{D(s)}{1 - D(s)} \quad (3.55)$$

Através de manipulação inversa (3.57) e (3.58), é possível, a partir dos dados adquiridos, obter

<sup>4</sup> Daí o sinal de seguimento  $x(t)$  não poder depender apenas de uma única frequência. Outra das vantagens deste método comparativamente à análise em frequência clássica tem a ver com o efeito do ruído, que é suprimido através da integração no tempo, de acordo com (3.46) e (3.48).

o modelo  $Q(s)$  de aproximação do sistema humano-máquina para anel aberto. Como

$$D(j\omega_k) = |D(j\omega_k)| e^{j\varphi_k} = \left| \frac{b_k}{a_k} \right| e^{j\varphi_k} \quad k \in \mathbb{N}^+ \quad (3.56)$$

substituindo (3.56) em (3.55) e atendendo a (3.50),  $|Q(j\omega_k)|$  virá

$$|Q(j\omega_k)| = \frac{\left| \frac{b_k}{a_k} \right| e^{j\varphi_k}}{\left| 1 - \frac{b_k}{a_k} e^{j\varphi_k} \right|} = \frac{e^{j\varphi_k}}{\left| \frac{a_k}{b_k} - e^{j\varphi_k} \right|} \quad (3.57)$$

e finalmente

$$|Q(j\omega_k)| = \frac{e^{j\varphi_k}}{\left| \frac{a_k}{b_k} - e^{j\varphi_k} \right|} \quad a_k > 0 \quad (3.58)$$

Recorrendo por simulação em MATLAB®/Simulink® à colocação iterativa de polos e de zeros, pode-se obter uma função de transferência  $Q(s)$  de aproximação, que permite caracterizar as principais características do sistema humano-máquina em anel aberto. Um método alternativo de identificação de sistemas lineares, que possibilita obter uma função de transferência aproximada a partir da resposta em frequência, é proposto em Lawrence & Rogers (1979).

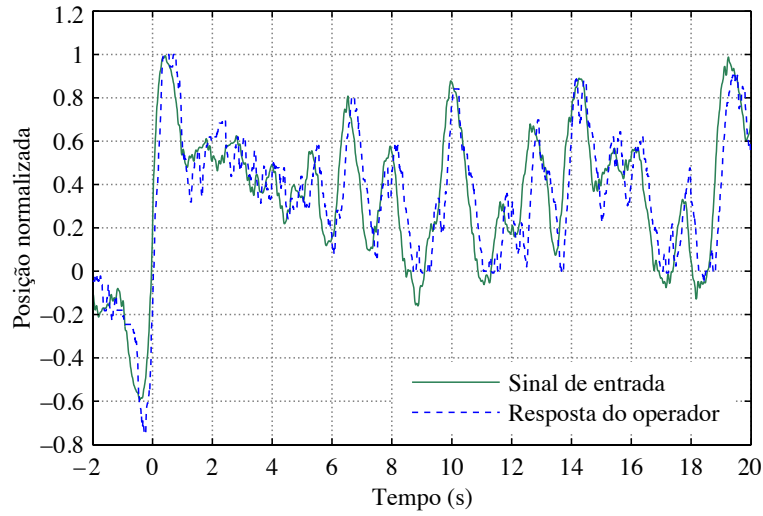


Figura 3.9: Amostras de uma experiência de seguimento unidimensional (primeiros 20 s), para uma frequência de amostragem de 100 Hz. O deslocamento  $x_0$  do sinal de entrada é 0,2 para  $t = 0$  s e para  $t = 12$  s.

### 3.3.5.2 Identificação com entradas e saídas independentes

Os sistemas de interação humano-máquina mais complexos surgem geralmente associados a ambientes de operação multidimensionais. A identificação deste tipo de modelos multivariáveis para anel aberto poderá ser simplificada, assumindo que a resposta de saída num dado eixo não influencia os eixos restantes (Antunes et al., 2012; Antunes et al., 2013a). Deste modo é possível definir um dado sistema linear humano-máquina com Multi-Entradas, Multi-Saídas (MIMO) a partir de funções de transferência independentes, desprezando os termos cruzados e dando assim origem

a um padrão matricial diagonal no espaço de estados. Uma representação simplificada do sistema humano-máquina em anel aberto, tomando como exemplo o Espaço Tridimensional (3D) é definida por

$$\begin{bmatrix} G_x(s) \\ G_y(s) \\ G_z(s) \end{bmatrix} = \mathbf{M}(s) \begin{bmatrix} J_x(s) \\ J_y(s) \\ J_z(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{xx}(s) & 0 & 0 \\ 0 & M_{yy}(s) & 0 \\ 0 & 0 & M_{zz}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x(s) \\ J_y(s) \\ J_z(s) \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

onde  $J_x(s)$ ,  $J_y(s)$  e  $J_z(s)$  correspondem às referências de entrada no domínio da frequência,  $G_x(s)$ ,  $G_y(s)$  e  $G_z(s)$  são as respostas respectivas do sistema humano-máquina no domínio da frequência e  $\mathbf{M}(s)$  é a matriz de transferência associada ao modelo humano-máquina multivariável.

Nesta técnica de identificação linear são utilizados conjuntos separados de dados para cada eixo cartesiano, sendo a função de transferência em anel fechado obtida para cada eixo através da aplicação do método melhorado de análise em frequência. O procedimento experimental consiste na realização de dois conjuntos de experiências de seguimento em perseguição, que são feitos alternadamente e de forma independente para cada eixo. As duas funções de transferência respectivas, que permitem caracterizar o sistema humano-máquina em anel aberto (3.58), são obtidas para cada eixo independente através do procedimento de manipulação inversa, descrito na subsubsecção 3.3.5.1.

### 3.3.5.3 Identificação com entradas independentes e saídas multidimensionais

Esta técnica de identificação (Antunes et al., 2013a), baseada no método melhorado de análise em frequência utiliza as entradas unidimensionais independentes dos sinais de seguimento de referência, estendendo a resposta aos sinais multidimensionais de saída. Deste modo, os dados experimentais relativos às saídas de seguimento são utilizados para a obtenção das funções de transferência correspondentes que caracterizam o sistema humano-máquina. O procedimento experimental de identificação para o Espaço Bidimensional comporta a realização de dois conjuntos de experiências de seguimento em perseguição, que são feitos alternadamente e de forma independente para cada eixo. Como os sinais adquiridos das saídas são bidimensionais, serão obtidas quatro funções de transferência.

Considerando os movimentos para o Espaço Tridimensional, seriam necessárias três conjuntos de experiências de seguimento, realizadas de forma independente para cada um dos eixos. Com respostas tridimensionais seriam obtidas nove funções de transferência para o sistema humano-máquina. A representação matricial multivariável correspondente utiliza os termos cruzados, sendo a matriz de transferência  $\mathbf{M}(s)$  do modelo humano-máquina, em anel aberto, definida por

$$\mathbf{M}(s) = \begin{bmatrix} M_{xx}(s) & M_{xy}(s) & M_{xz}(s) \\ M_{yx}(s) & M_{yy}(s) & M_{yz}(s) \\ M_{zx}(s) & M_{zy}(s) & M_{zz}(s) \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

### 3.3.5.4 Identificação com entradas e saídas multidimensionais

Estudos recentes (Antunes et al., 2010a) revelaram que o comportamento de um sistema humano-máquina poderá não ser suficientemente definido através de um único modelo Linear Invariante no Tempo, dependendo inclusivamente do tipo de tarefas envolvidas. Pode assim, à partida, ser mais adequada a utilização quer de entradas multidimensionais quer de respostas de seguimento multidimensionais, para se obter a matriz de transferência  $M(s)$  em anel aberto (3.60) (Antunes et al., 2013a), já que neste método de identificação a representação matricial multivariável também utiliza os termos cruzados.

Em qualquer das metodologias de identificação baseadas no método melhorado de análise em frequência (Antunes et al., 2010a; Antunes et al., 2013a), o sinal de seguimento normalizado  $x(t)$  é gerado através do somatório de diversas sinusoides ( $N_S$ ), com frequências fixas, devendo permitir a realização por um operador humano de uma tarefa de seguimento manual em perseguição<sup>5</sup>. Os sinais multidimensionais de seguimento são construídos de maneira a assegurar que as respostas para cada eixo não sejam correlacionadas. Daí que nesta técnica de identificação, os sinais periódicos de seguimento sejam gerados, para cada eixo, a partir de diferentes frequências individuais, possuindo estes sinais um período distinto. O procedimento experimental para a modelagem MIMO com entradas e saídas multidimensionais considera um conjunto de experiências de seguimento em perseguição, com a mesma duração, para a obtenção dos elementos de  $M(s)$ .

### 3.3.5.5 Aplicação de *software* para identificação humano-máquina

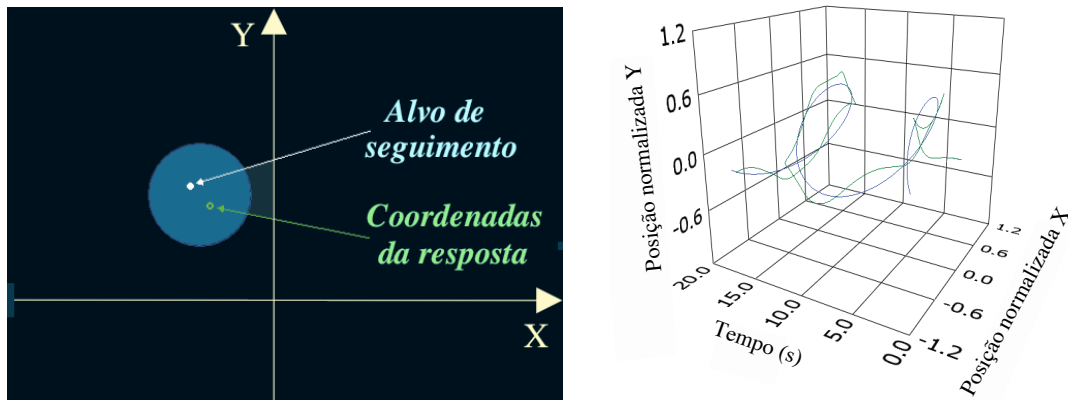
Na realização das experiências de seguimento com uma dada Interface Humano-Máquina, o alvo móvel de referência (ou seguimento) a perseguir é apresentado no ecrã do monitor (figura 3.10), através de uma aplicação de *software*, concebida em LabVIEW®, para a identificação de sistemas humano-máquina, o teste de controladores de assistência e a análise do desempenho. Para simular o processo em que a operação se integra, é ainda possível incluir, na aplicação desenvolvida, determinadas dinâmicas, expressas por uma ou por várias funções de transferência, consoante se trate de um sistema com Uma Entrada e Uma Saída (SISO) ou de um sistema com Multi-Entradas, Multi-Saídas (MIMO). A aplicação permite ainda a implementação de um controlador, para a melhoria do desempenho da tarefa humano-máquina.

## 3.4 Projeto de controladores com integração do humano

Esta secção aborda o projeto e a implementação de controladores, que possibilitam a melhoria do desempenho nos sistemas de interação humano-máquina. O campo de aplicação das técnicas descritas incide sobre os sistemas lineares (subsecções 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3 e 3.4.5) e os sistemas não lineares (subsecção 3.4.4). A figura 3.11 ilustra o diagrama de blocos simplificado de um

---

<sup>5</sup> A navegação, a pilotagem e a condução são os exemplos mais comuns deste tipo de tarefa. O estudo das tarefas de seguimento, além de permitir a identificação de modelos matemáticos, é também importante, porque estas tarefas encontram-se presentes em muitas atividades que requerem a intervenção humana.



(a) Experiência de seguimento manual em perseguição.

(b) Visualização gráfica das trajetórias do alvo móvel e da resposta do operador.

Figura 3.10: (a) Experiência de seguimento manual através do ecrã; (b) visualização gráfica dos resultados.

sistema de controlo humano-máquina com Uma Entrada e Uma Saída, inspirado na arquitetura da figura 2.9 (capítulo 2, secção 2.2),

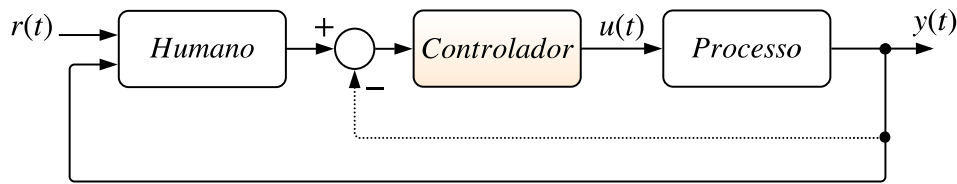


Figura 3.11: Diagrama de blocos simplificado para o projeto de controlo humano-máquina.

sendo  $r(t)$  a entrada de referência,  $u(t)$  a variável de controlo e  $y(t)$  a resposta do sistema resultante.

### 3.4.1 Compensadores de deslocamento de fase

Um compensador de avanço (*lead*) de fase (Antunes et al., 2010b; Levine, 2010) é um dispositivo que se acrescenta em série ao processo, cuja função de transferência é definida por

$$C_{DF}(s) = \frac{s - z_{DF}}{s - p_{DF}} \quad (3.61)$$

sendo os escalares  $z_{DF}$  e  $p_{DF}$ , números reais negativos, com  $z_{DF} > p_{DF}$ . O compensador de avanço de fase utiliza-se para aumentar a margem de fase, adicionando fase na frequência em que o ganho da função de transferência em cadeia aberta é unitário. Este efeito de compensação irá possibilitar a melhoria da resposta transiente, embora tal seja feito à custa de um aumento do ganho.

Um compensador de atraso (*lag*) de fase é um dispositivo que se coloca em série com o processo e cuja função de transferência é dada por (3.61), sendo agora  $z_{DF}$  e  $p_{DF}$ , números reais negativos, com  $z_{DF} < p_{DF}$ . O compensador de atraso de fase tira partido da atenuação do ganho, por forma a deslocar a frequência a 0 dB para a frequência que corresponde à margem de fase

pretendida. A função do compensador de atraso consiste em poder melhorar a resposta no estado estacionário de um sistema em anel fechado, embora à custa de uma diminuição da fase.

Os compensadores de avanço de fase e de atraso de fase, também designados de compensadores de Deslocamento de Fase (PS), podem ser projetados de forma independente, ou seja, pode-se dimensionar um compensador de avanço de fase de modo a que o sistema em anel fechado cumpra as especificações da resposta transiente, sem tomar em consideração a resposta em estado estacionário, e vice-versa para um compensador de atraso de fase. Para o caso do compensador de atraso de fase torna-se ainda necessário que o ganho seja suficientemente elevado, para que o polo  $p_{DF}$  do compensador possa ficar mais próximo do seu zero  $z_{DF}$ , evitando assim um atraso na resposta transiente.

### 3.4.2 Controlador proporcional, integral e derivado, com *anti-windup*

O Controlador Proporcional, Integral e Derivado (PID) é de longe o algoritmo mais utilizado em sistemas de controlo, sendo inúmeras as suas aplicações na indústria. Este tipo de controlador é definido, na sua forma mais genérica em tempo contínuo, por

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.62)$$

ou ainda

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.63)$$

com

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3.64)$$

sendo  $u(t)$  a variável de controlo,  $r(t)$  a entrada de referência,  $y(t)$  o valor medido,  $e(t)$  o erro de controlo (3.64) e  $K_p$  o ganho proporcional.  $T_i$  é a constante de tempo associada à componente integral e  $T_d$  é a constante de tempo associada à componente derivada. Os ganhos integral e derivado do controlador PID de (3.63) são, respetivamente, definidos em (3.65) e (3.66).

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (3.65)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (3.66)$$

Para o domínio da frequência, a função de transferência  $C_{PID}(s)$  do Controlador Proporcional, Integral e Derivado (PID) de (3.62) é dada por

$$C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.67)$$

o que equivale a

$$C_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.68)$$



É possível implementar um controlador PID de assistência para um sistema de interação humano-máquina com recurso a uma Unidade de Microprocessador (MPU) ou a uma Unidade de Microcontrolador (MCU) dedicada. No entanto, algumas questões têm de ser tomadas em conta para a implementação digital do controlador PID de (3.67) ou (3.68), nomeadamente quanto aos aspetos como a amostragem <sup>6</sup>, a quantização ou a discretização. Uma versão em tempo discreto do controlador PID de (3.68) pode ser implementada através de (3.69), utilizando por exemplo o método de discretização de Tustin (Åström & Hägglund, 1988; Åström & Wittenmark, 1997), sendo  $N_{PID}$  o coeficiente do Filtro Passa-Baixo (LPF) de *anti-aliasing* usado para a implementação do controlador  $C_{PID}(z)$ , e  $T_s$  o período de amostragem.

$$C_{PID}(z) = K_p + K_i T_s \frac{1}{z-1} + K_d \frac{N_{PID}}{1 + N_{PID} T_s \left(\frac{1}{z-1}\right)} \quad (3.69)$$

Quando um sistema de controlo humano-máquina se encontra em funcionamento, pode ocorrer que as variáveis de controlo atinjam os limites do atuador, sendo então a retroação interrompida, porque o atuador irá manter-se no seu limite, independentemente da saída do processo. Se no sistema de controlo for utilizado um regulador com ação integral, o erro continuará a ser integrado. Tal significa que o termo integral poderá tornar-se demasiado elevado, sendo necessário que o valor do erro mude de sinal por um certo período de tempo, até que a situação volte ao normal. A consequência deste efeito é que qualquer controlador com ação integral poderá originar transientes elevados quando o atuador satura <sup>7</sup>.

A figura 3.12 ilustra o diagrama de blocos do Controlador Proporcional, Integral e Derivado (PID) com *anti-windup*, implementado em Antunes et al. (2016), através do algoritmo 3.3, com  $K = K_p$ .

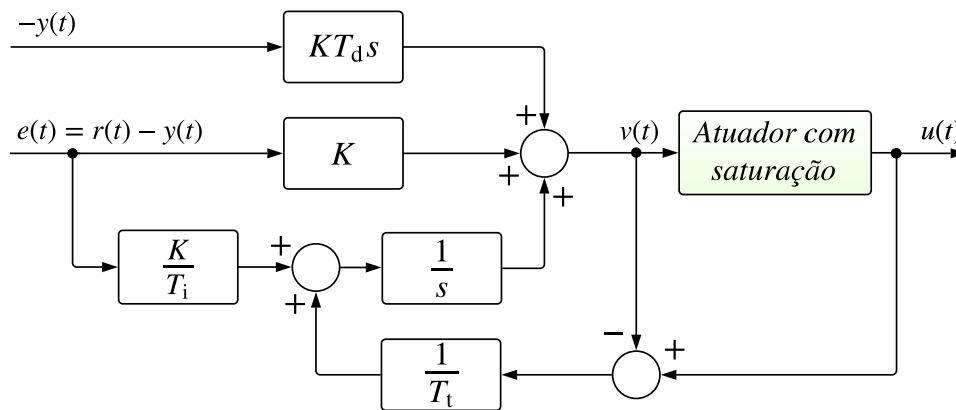


Figura 3.12: Diagrama de blocos do Controlador Proporcional, Integral e Derivado (PID) com *anti-windup* (Åström & Hägglund, 1988).

<sup>6</sup> Refira-se que o efeito de *aliasing* faz com que uma perturbação de alta frequência após a amostragem possa ser confundida com um sinal de baixa frequência. Daí a necessidade de incluir um Filtro Passa-Baixo de *anti-aliasing* nas implementações discretas do controlador PID.

<sup>7</sup> Pelo que a ação de *reset windup* deverá ocorrer quando um regulador com ação integral é apenas a um processo com um atuador em saturação.

Algoritmo 3.3: Implementação de um controlador PID com *anti-windup* (Åström & Hägglund, 1988).

---

```

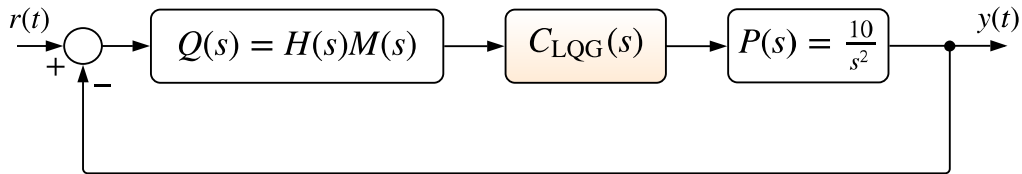
1: // Cálculo dos coeficientes do controlador:
2:  $b_i = \frac{K T_s}{T_i}$  ; // ganho integral, considerando o período de amostragem  $T_s$ 
3:  $a_d = \frac{2T_d - NT_s}{2T_d + NT_s}$  ; // aproximação de Tustin
4:  $b_d = \frac{2KN T_d}{2T_d + NT_s}$  ; // ganho derivado
5:  $a_0 = \frac{T_s}{T_i}$  ; // integral windup
6: // Algoritmo de controlo:
7:  $r = \text{adin}(\text{ch1})$  ; // lê a referência (entrada analógica do canal 1)
8:  $y = \text{adin}(\text{ch2})$  ; // lê a variável do processo (entrada analógica do canal 2)
9:  $P = K(r - y)$  ; // calcula a componente proporcional ( $K = K_p$ )
10:  $D = a_d D_{k-1} - b_d(y - y_{k-1})$  ; // atualiza a componente derivada
11:  $v = P + I + D$  ; // calcula a saída temporária
12:  $u = \text{sat}(v, u_{\text{low}}, u_{\text{high}})$  ; // simula a saturação do atuador
13:  $\text{daout}(\text{ch1})$  ; // ativa a saída analógica do canal 1
14:  $I = I_{k-1} + b_i(r - y) + a_0(u - v)$  ; // atualiza o termo integral
15:  $y_{k-1} = y$  ; // atualiza a saída anterior do processo

```

---

### 3.4.3 Controlador ótimo linear quadrático gaussiano

O projeto de controlo Linear Quadrático Gaussiano (LQG) possibilita a obtenção de um controlador ótimo, a partir dos dados experimentais de um sistema humano-máquina, atuando num dado processo (figura 3.13). A metodologia do projeto de controlo LQG, baseia-se numa combinação entre um regulador ótimo e um estimador ótimo, resultando numa solução de compromisso entre o desempenho e o esforço de controlo, que toma também em conta o ruído da medida e as perturbações intrínsecas ao processo. O controlador ótimo LQG consiste assim numa combinação de um Regulador Linear Quadrático (LQR) com um Estimador Linear Quadrático (LQE).

Figura 3.13: Diagrama de blocos de um sistema de controlo humano-máquina interagindo no processo  $P(s)$ .

Para o projeto do controlador ótimo Linear Quadrático (LQ) de Uma Entrada e Uma Saída, em tarefas de seguimento manual em perseguição, é considerado (Antunes et al., 2013a; Antunes et al., 2010a; Levine, 2010), o critério quadrático  $J(r(t))$ , definido por

$$J(r(t)) = \int_0^{\infty} (y^2(t) + \rho r^2(t)) dt \quad (3.70)$$

sendo  $r(t)$  o sinal de referência de entrada,  $y(t)$  o sinal de resposta, e  $\rho$  o peso que representa o compromisso entre o desempenho da regulação e o esforço de controlo. O Estimador Linear Quadrático pode ser implementado através de um estimador de Kalman. A estabilidade do sistema

em anel fechado é obtida com a síntese LQE, sendo que o princípio da separação garante que o regulador e o estimador podem ser projetados de forma independente (Åström & Wittenmark, 1997). Para o projeto de controlo ótimo em sistemas MIMO, a matriz  $K$  de ganho, para a qual a lei de retroação  $u = -Kx$  minimiza a função quadrática de custo

$$J(u) = \int_0^{\infty} (x^T Q x + 2x^T N u + u^T R u) dt \quad (3.71)$$

é calculada resolvendo a equação correspondente de Riccati. Convém referir que a síntese LQG nem sempre assegurará boas propriedades de robustez, tendo estas de ser confirmadas separadamente através de técnicas de “*loop-shaping*”, obtendo por exemplo os limites de incerteza do modelo (Chao & Athans, 1999). No capítulo 4 (subsubsecção 4.4.2.5) e em Antunes et al. (2013a), são apresentados os resultados experimentais da estratégia de controlo adotada, que recorre ao projeto de controlo ótimo LQG com as margens de incerteza do modelo.

### 3.4.4 Controlador de assistência com base em transferência de conhecimento

Estudos anteriores (Antunes et al., 2013a; Gaines, 1969; Palma et al., 2012), mostraram que em tarefas de controlo manuais simples, os modelos lineares e quase-lineares podem servir para caracterizar o comportamento de um sistema humano-máquina. Por outro lado, em muitos sistemas de controlo manual, o operador humano ainda se encontra muitas vezes dependente do *feedback* visual, e a informação disponível para o projeto do controlador de assistência é frequentemente insuficiente. Nestes casos, a obtenção de modelos lineares do comportamento do sistema humano-máquina poderá ser uma tarefa de dificuldade acrescida, e outras soluções complementares, como a utilização de técnicas baseadas em transferência de aprendizagem (Jiang et al., 2010; Pan & Yang, 2010; Wu et al., 2013; Yang et al., 2013a), deverão ser também tomadas em consideração para o projeto de controladores de assistência.

A transferência de conhecimento ou de aprendizagem estuda o problema de adquirir o conhecimento na resolução de uma situação, aplicando-o em outra situação relacionada. Outra definição para transferência de aprendizagem poderá ser a que um operador humano (B) pode aprender diretamente a partir de outro operador humano (A) suficientemente correlacionado.

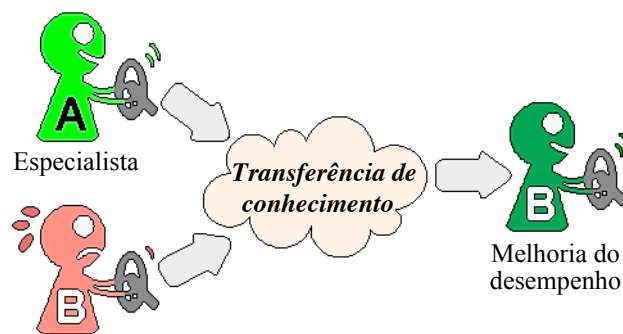


Figura 3.14: Ilustração conceptual de um sistema de assistência baseado no conceito de transferência de conhecimento.

Se o conhecimento do operador especialista (figura 3.14) for utilizado por um outro operador, significa que a transferência de aprendizagem é induzida. O procedimento para a transferência de conhecimento utilizado na Mecatrónica Adaptada ao Humano (HAM), envolve a escolha de uma estratégia de controlo, tomando em consideração que o operador faz parte do sistema humano-máquina resultante (Li et al., 2014). Um controlador de assistência, baseado em transferência de aprendizagem, toma em conta o conhecimento prévio adquirido por um operador humano de referência, ou especialista, e os dados obtidos, em Tempo-Real, do operador a assistir.

#### 3.4.4.1 Análise de correlação

A análise de correlação do conjunto dos  $m$  sinais discretizados da Interface Humano-Máquina (HMI), para um operador humano de referência (U) e outro operador humano (V) pode ser calculada a partir de dados experimentais adquiridos de uma dada interface, para o mesmo tipo de tarefas com idêntica duração. As matrizes de coeficientes de correlação  $\mathbf{R}_V$  e  $\mathbf{R}_U$  para os operadores genéricos V e U são definidas, respetivamente, por

$$\mathbf{R}_V = \begin{bmatrix} 1 & v_{12} & v_{13} & \cdots & v_{1m} \\ v_{12} & 1 & v_{23} & \cdots & v_{2m} \\ v_{13} & v_{23} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 1 & v_{m-1\ m} \\ v_{1m} & v_{2m} & \cdots & v_{m-1\ m} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

e

$$\mathbf{R}_U = \begin{bmatrix} 1 & u_{12} & u_{13} & \cdots & u_{1m} \\ u_{12} & 1 & u_{23} & \cdots & u_{2m} \\ u_{13} & u_{23} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 1 & u_{m-1\ m} \\ u_{1m} & u_{2m} & \cdots & u_{m-1\ m} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

As matrizes  $\mathbf{R}_V$  e  $\mathbf{R}_U$  são simétricas, porque a correlação entre os sinais  $s_v$  e  $s_u$  é idêntica à correlação <sup>8</sup> entre os sinais  $s_u$  e  $s_v$ . Os elementos diagonais destas matrizes (3.72) e (3.73) são iguais a um, correspondendo ao caso particular dos mesmos sinais. A matriz residual  $\mathbf{R}_W$  é obtida por  $\mathbf{R}_V - \mathbf{R}_U$ , sendo

$$\mathbf{R}_W = \begin{bmatrix} 0 & (v_{12} - u_{12}) & (v_{13} - u_{13}) & \cdots & (v_{1m} - u_{1m}) \\ (v_{12} - u_{12}) & 0 & (v_{23} - u_{23}) & \cdots & (v_{2m} - u_{2m}) \\ (v_{13} - u_{13}) & (v_{23} - u_{23}) & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 & (v_{m-1\ m} - u_{m-1\ m}) \\ (v_{1m} - u_{1m}) & (v_{2m} - u_{2m}) & \cdots & (v_{m-1\ m} - u_{m-1\ m}) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

<sup>8</sup> Pretende-se correlacionar sinais de ações de controlo humanas, associados a evoluções espaciais e temporais. Considerando, por exemplo, um sistema de condução com um operador, os sinais da interface a adquirir e a correlacionar podem ser o valor da posição do volante e as posições do acelerador e do travão.

Com base em experiências com diferentes operadores humanos em um sistema humano-máquina é possível estabelecer graus de correlação na execução de uma certa tarefa, e de seguida obter uma condição de correlação para a transferência de aprendizagem entre operadores <sup>9</sup>. A condição para a transferência de aprendizagem proposta neste trabalho (3.76), resulta de uma regra empírica que toma em conta o valor absoluto de  $R_{\text{val}}$ , definido por

$$|R_{\text{val}}| = |(R_{\text{max}} - R_{\text{min}}) + R_{\text{sum}}| \quad (3.75)$$

sendo  $R_{\text{max}}$  o valor máximo da matriz residual  $\mathbf{R}_W$  (3.74),  $R_{\text{min}}$  o valor mínimo de  $\mathbf{R}_W$ , e  $R_{\text{sum}}$  a soma de todos os elementos de  $\mathbf{R}_W$ . A condição para a transferência de aprendizagem

$$|R_{\text{val}}| \leq \varsigma \quad \varsigma \in \mathbb{R}^+ \quad (3.76)$$

é proposta a partir de diversas experiências realizadas com recurso a um simulador de condução de Fórmula 1. O valor limite  $\varsigma$  para a condição de transferência de aprendizagem (3.76) é obtido a partir dos resultados experimentais respetivos, apresentados e analisados no capítulo 4 (secção 4.5).

#### 3.4.4.2 Algoritmo difuso de $c$ -médias

As metodologias difusas que possam tirar partido do conhecimento de um sistema de interação humano-máquina constituem alternativas às abordagens clássicas de modelagem, identificação e controlo, uma vez que o comportamento do operador humano é por vezes difícil de se obter, quando se executam tarefas complexas.

O Algoritmo Difuso de  $c$ -Médias (FCM) é proposto em Antunes et al. (2015), como uma ferramenta para encontrar grupos naturais de dados <sup>10</sup>, que poderão conter regras idênticas de execução de tarefas, e para a identificação de padrões de execução de tarefas. O algoritmo FCM é um método de agrupamento em que cada amostra de dados pertence a um certo agrupamento com um grau de pertença (valores mais elevados indicam uma maior confiança na atribuição de um conjunto de dados a um agrupamento). O algoritmo FCM foi inicialmente desenvolvido em 1974 por Dunn e melhorado mais tarde por Bezdek. Este algoritmo iterativo (Bezdek et al., 1984; Dunn, 1974) permite obter uma partição ótima, através da minimização da função de custo  $J_{\text{FCM}}$ , definida por

$$J_{\text{FCM}} = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^C (u_{ik})^{q_{\text{FCM}}} d^2(z_k, c_i) \quad (3.77)$$

$Z = \{z_{k=1}, z_{k=2}, z_{k=3}, \dots, z_{k=N}\}$  é o conjunto de  $N$  amostras, cada uma com dimensão  $p$ ,  $C$  é o número de agrupamentos satisfazendo a condição  $2 \leq C < N$ ,  $u_{ik}$  é o grau de pertença de  $z_k$  ao agrupamento  $i$ .  $c_i$  é o centro  $p$ -dimensional do agrupamento  $i$ ,  $d(z_k, c_i)$  é a distância entre o centro  $c_i$  e a amostra de dados  $z_k$ , e  $q_{\text{FCM}}$  é o fator de peso da função de agrupamento. O algoritmo 3.4

<sup>9</sup> Saliente-se que o conceito de transferência de aprendizagem, ou ainda de *inductive transfer* na terminologia anglo-saxónica, pressupõe a existência de um certo grau de correlação entre os operadores humanos, conforme é evidenciado no capítulo 4 (secção 4.5).

<sup>10</sup> Também designados na terminologia anglo-saxónica de *clusters*.

descreve o procedimento para a minimização da função  $J_{\text{FCM}}$  de (3.77). Este algoritmo inicializa sempre com diferentes condições iniciais, trocando a ordem dos centroides. Um método para a estimação do número  $C$  de agrupamentos e dos seus valores iniciais é proposto em Chiu (1994).

---

Algoritmo 3.4: Minimização da função de custo  $J_{\text{FCM}}$ .

---

- 1: Define valores para  $q_{\text{FCM}}$ ,  $C$ , e para o parâmetro  $\varepsilon$  do critério de terminação.
  - 2: Inicializa a matriz de agrupamento difuso  $U = [u_{ik}]$ .
  - 3: Inicializa o contador de ciclo  $l$  a 0.
  - 4: Calcula os centros do agrupamento  $\{c_i^{(l)}\}$  com  $U^{(l)}$ , sendo
 
$$c_i^{(l)} = \frac{\sum_{k=1}^N (u_{ik}^{(l)})^{q_{\text{FCM}}} z_k}{\sum_{k=1}^N (u_{ik}^{(l)})^{q_{\text{FCM}}}}$$
  - 5: Atualiza a matriz de agrupamento difuso  $U^{(l+1)}$ , calculando os novos valores de pertença para a coluna  $k$  da matriz de agrupamento difuso, com
 
$$u_{ik}^{(l+1)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^C \left( \frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right)^{\frac{2}{(q_{\text{FCM}}-1)}}}$$
  - 6: **if**  $\|U^{(l)} - U^{(l+1)}\| < \varepsilon$  **then**
  - 7:   Pára.
  - 8: **else**
  - 9:   Incrementa  $l$  e retorna a 4.
  - 10: **end if**
- 

### 3.4.4.3 Metodologia de controlo

Para os sistemas de interação humano-máquina que dependem exclusivamente da informação visual de *feedback* do operador humano, integrado no anel de controlo, é proposta uma metodologia de transferência de aprendizagem entre operadores, baseada num algoritmo difuso, destinada ao projeto com controlo comutado não-linear (Hespanha et al., 2001; Liberzon, 2003) de controladores PID de assistência ao operador. Tendo em conta o número mínimo  $C$  de estados associados a uma dada tarefa humano-máquina a realizar <sup>11</sup>, a estratégia proposta de projeto de controlo com base em transferência de conhecimento (Antunes et al., 2017; Antunes et al., 2015) é descrita no algoritmo 3.5. O ganho proporcional  $K_{p1}$  é ajustado para a melhoria do desempenho do operador no estado que ocorre com maior frequência (ex: estado 1: condução em linha reta).

Os ganhos proporcionais  $\{K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_{pC}\}$  dos controladores PID de comutação mantêm entre si a proporcionalidade, face à projeção dos centroides no sinal utilizado da Interface Humano-Máquina que apresenta a maior variabilidade (ex: valor absoluto da posição do volante.). Os ganhos integrais  $\{K_{i1}, K_{i2}, \dots, K_{iC}\}$  dos controladores PI são sintonizados, por forma a reduzir o esforço do operador humano em cada um dos estados considerados da tarefa (ex: condução em linha reta, numa curva leve e numa curva apertada). Após o ajuste dos controladores PI os ganhos derivados  $\{K_{d1}, K_{d2}, \dots, K_{dC}\}$  dos controladores PID (3.69) são escolhidos de modo a aumentar a largura de banda e a garantir uma sobre-elevação predeterminada.

---

<sup>11</sup> Numa tarefa de condução, os estados mínimos podem ser a condução em linha reta, numa curva leve ou em curva apertada. Como é utilizado um controlador não-linear de comutação, um número maior de estados poderá levar a instabilidade se um tempo mínimo (*dwell time*) não for garantido (Liberzon, 2003).

Algoritmo 3.5: Estratégia de controlo com base em transferência de conhecimento.

- 1: É identificado o número mínimo  $C$  de estados associados à tarefa humano-máquina, que correspondem ao número mínimo de agrupamentos dos sinais adquiridos da interface utilizada.
- 2: O Algoritmo Difuso de  $c$ -Médias (FCM) extrai os centroides dos agrupamentos dos dados obtidos para a melhor tarefa realizada pelo operador especialista, cujas coordenadas respetivas correspondem às projeções nos sinais da Interface Humano-Máquina.
- 3: O ganho proporcional  $K_{p1}$  é ajustado para a melhoria do desempenho do operador no estado que ocorre com maior frequência (ex: estado 1: condução em linha reta). Os ganhos proporcionais  $\{K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_{pC}\}$  dos controladores PID de comutação mantêm entre si a proporcionalidade, face à projeção dos centroides no sinal utilizado da Interface Humano-Máquina que apresenta a maior variabilidade. A escolha dos ganhos integrais dos  $C$  controladores PI é feita de modo a reduzir o esforço do operador. Os ganhos derivativos  $\{K_{d1}, K_{d2}, \dots, K_{dC}\}$  dos controladores PID correspondentes são escolhidos por forma a aumentar a largura de banda e garantir ainda uma sobre-elevação predefinida.
- 4: O estimador de estado calcula, em cada instante discreto, a distância euclidiana dos sinais da interface aos centroides do operador especialista, estimando em cada instante o estado  $i$ , que corresponde ao centroide  $c_i$  situado a menor distância.
- 5: Cada controlador PID de assistência é seleccionado para o estado estimado, tendo em conta os sinais da interface com o operador humano, adquiridos em Tempo-Real, e a menor distância aos centroides característicos do operador especialista, previamente obtidos pelo algoritmo FCM. É assim adotado o controlador PID adequado ao estado  $i$  de condução, estimado de um conjunto de  $C$  controladores PID.

A figura 3.15 ilustra o diagrama de blocos da arquitetura do controlador de assistência de Tempo-Real baseado em transferência de aprendizagem, para um sistema humano-máquina constituído por um simulador de condução com volante, acelerador e travão, considerando três diferentes estados ( $C = 3$ ) para a tarefa de condução (em linha reta, em curvas leves e apertadas).

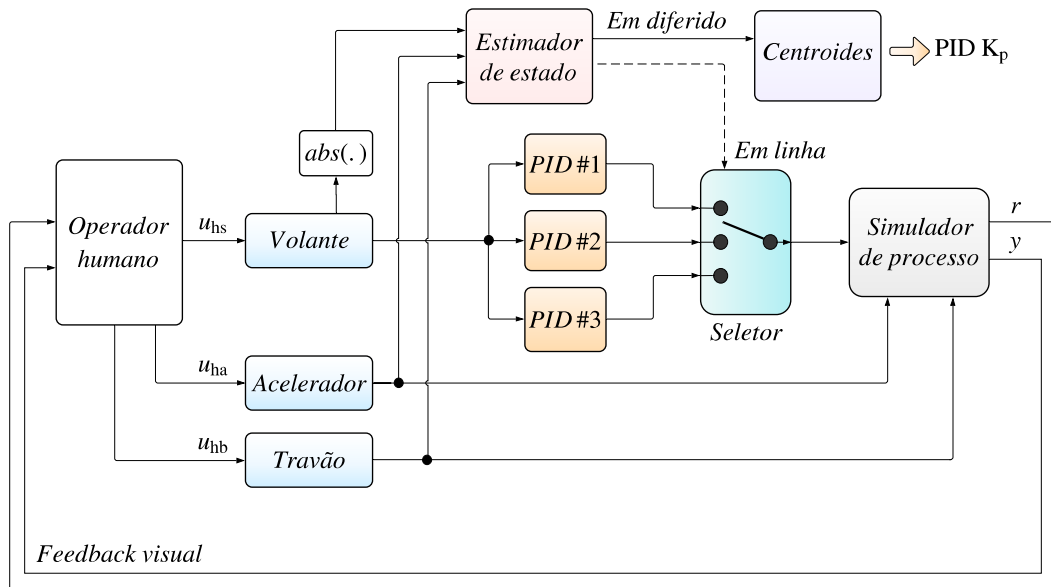


Figura 3.15: Arquitetura do controlador de assistência baseado em transferência de conhecimento, para tarefas de condução num simulador. O seletor é inspirado no modelo MOSAIC (capítulo 2, secção 2.1).

O estimador de estado estima, em Tempo-Real, o estado atual de condução, calculando a distância euclidiana entre os sinais da interface aos centroides dos três agrupamentos dos dados, utilizando

um período de amostragem  $T_s$  de 10 ms. Os centroides dos agrupamentos são previamente obtidos através do algoritmo FCM, aplicado à melhor tarefa de condução realizada pelo operador de referência.

### 3.4.5 Sintonia de controladores através de otimização inspirada na natureza

Os algoritmos meta-heurísticos inspirados na natureza encontram-se entre as metodologias mais poderosas de otimização. O Algoritmo dos Pirilampos (FA) (Yang, 2014a; Yang et al., 2013b; Yang, 2010b) é um dos algoritmos de otimização recentemente criados, sendo inspirado no comportamento das emissões de luz fosforescente que caracterizam os pirilampos, ou vaga-lumes (figura 3.16). Diversos estudos (Agarwal et al., 2013; Bhushan & Pillai, 2013; Yang, 2010a; Yang, 2009) vieram comprovar a elevada eficiência deste algoritmo de otimização, considerado superior à maioria dos algoritmos meta-heurísticos.

#### 3.4.5.1 Algoritmo dos pirilampos

O comportamento social dos pirilampos, através da sua luz cintilante, providencia um meio eficiente de atravessamento no espaço de procura. A nebulosidade do ambiente e o grau de atratividade entre os pirilampos são fatores a ter em conta para a resolução do problema concreto de procura.

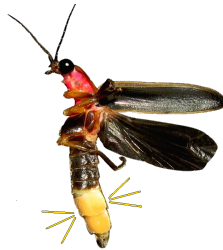


Figura 3.16: Pirilampo ou vaga-lume da espécie *Photinus pyralis* (imagem adaptada de <https://www.flickr.com/photos/artfarmer/198487523/>): inseto da ordem dos coleópteros, caracterizado pelas suas emissões de luz fosforescente.

No algoritmo meta-heurístico dos pirilampos são consideradas as seguintes regras comportamentais:

- Todos os pirilampos são atraídos entre si, sendo a atratividade proporcional ao seu brilho. Assim, no caso de existirem apenas dois pirilampos, o pirilampo que brilha menos irá mover-se para o pirilampo que brilha mais.
- O brilho decresce com o aumento da distância. No caso de não haver outro pirilampo mais brilhante, o pirilampo irá mover-se de forma aleatória.
- O brilho de um pirilampo depende da “paisagem”<sup>12</sup> onde este se encontra, associada à função de objetivo.

<sup>12</sup> Podendo fazer parte do espaço euclidiano  $d$ -dimensional.



No Algoritmo dos Pirilampos (FA) existem dois fatores importantes a ter em conta, designadamente a variação da intensidade luminosa e a atratividade. Por simplicidade pode assumir-se que a atratividade  $\beta$  de um pirilampo face a outro pirilampo é determinada pelo brilho do primeiro, que, por sua vez, está associado à função objetivo a atingir num determinado espaço de procura. Como a intensidade luminosa decresce com a distância à sua fonte, sendo a luz também absorvida no meio ambiente, a atratividade irá variar com o fator de absorção da luz. Numa população de  $n$  pirilampos, a atratividade  $\beta$  de um pirilampo  $j$  face aos pirilampos adjacentes é assim relativa, já que dependerá da distância  $r_{ij}$  no espaço de procura considerado entre o pirilampo  $j$  e cada pirilampo  $i$  adjacente. A intensidade luminosa  $I(r)$  varia com a lei do quadrado inverso, conforme

$$I(r) = \frac{I_s}{r^2} \quad (3.78)$$

sendo  $I_s$  a intensidade na fonte. Para um ambiente com absorção de luz, a intensidade luminosa varia com a distância  $r$ , de acordo com

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r} \quad (3.79)$$

sendo  $\gamma$  o coeficiente de absorção luminosa e  $I_0$  a intensidade luminosa original. Atendendo à singularidade em  $r = 0$  de (3.78), o efeito combinado da lei do quadrado inverso e da absorção luminosa (3.79) pode ser aproximado a

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma^2 r^2} \quad (3.80)$$

Como a atratividade  $\beta$  de um dado pirilampo no espaço de procura é proporcional à sua intensidade luminosa, reconhecida no ambiente pelos pirilampos adjacentes, essa atratividade será obtida através de

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma^2 r^2} \quad (3.81)$$

À distância  $r = 0$ , a atratividade do pirilampo é  $\beta_0$ . A distância cartesiana  $r_{ij}$  no espaço euclidiano  $d$ -dimensional entre dois pirilampos  $i$  e  $j$ , situados em  $\mathbf{x}_i$  e  $\mathbf{x}_j$ , é definida por

$$r_{ij} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| \quad (3.82)$$

ou seja

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (3.83)$$

Quando um dado pirilampo  $i$  na posição  $\mathbf{x}_i$  é atraído para outro pirilampo  $j$  mais brilhante, a sua nova posição  $\mathbf{x}'_i$  no espaço euclidiano  $d$ -dimensional será obtida por

$$\mathbf{x}'_i = \mathbf{x}_i + \beta_0 e^{-\gamma^2 r_{ij}^2} (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) + \alpha \epsilon_i \quad (3.84)$$

O termo  $\alpha \epsilon_i$  é um termo de aleatoriedade, sendo  $\alpha \in [0, 1]$  o parâmetro de aleatoriedade respetivo

e  $\epsilon_i$  um vetor, de dimensão  $d$ , de números aleatórios com distribuição uniforme<sup>13</sup>. Outras distribuições podem ser utilizadas para o termo de aleatoriedade  $\alpha \epsilon_i$  em (3.84), como por exemplo os voos de Lévy<sup>14</sup>. O procedimento meta-heurístico de otimização baseado no comportamento dos pirilampos é descrito no algoritmo 3.6.

---

Algoritmo 3.6: Algoritmo dos Pirilampos (Yang, 2010b).

---

```

1: Define a função de objetivo  $f(\mathbf{x})$ , sendo  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_d]^T$ .
2: Gera a população inicial de  $n$  pirilampos  $\mathbf{x}_{i=1,2,\dots,n}$ .
3: A intensidade luminosa  $I_i$  em  $\mathbf{x}_i$  é obtida a partir de  $f(\mathbf{x}_i)$ .
4: Define o coeficiente de absorção luminosa  $\gamma$ .
5: Define a atratividade  $\beta_0$  para a distância ( $r = 0$ ).
6: Define o parâmetro de aleatoriedade  $\alpha$ .
7: Define o número máximo de iterações  $Max\_iter$ .
8: while  $iter < max\_iter$  do
9:   for  $i = 1 : n$  do
10:    for  $j = 1 : n$  do
11:      if  $I_i < I_j$  then
12:        Move o pirilampo  $i$  para  $j$ .
13:      end if
14:      Varia a atratividade com a distância  $r$  através do termo  $e^{-\gamma r}$ .
15:      Avalia as novas soluções e atualiza a intensidade luminosa.
16:    end for
17:  end for
18:  Gradua os  $n$  pirilampos e encontra o atual melhor global  $\mathbf{g}^*$ .
19: end while
20: Pós-processamento e visualização dos resultados.
```

---

O desenvolvimento em série de Taylor do termo exponencial é

$$e^{-\gamma r_{ij}^2} \approx 1 - \gamma r_{ij}^2 + \frac{\gamma^2 r_{ij}^4}{2} - \dots \quad (3.85)$$

Sendo normalmente mais lento calcular a função exponencial  $e^{-\gamma r_{ij}^2}$  do que a função  $1 / (\gamma r_{ij}^2 + 1)$ , uma forma de poder melhorar a rapidez computacional do algoritmo será em (3.84) aproximar a função exponencial (3.85) por

$$\frac{1}{\gamma r_{ij}^2 + 1} \approx 1 - \gamma r_{ij}^2 + \gamma^2 r_{ij}^4 - \dots \quad (3.86)$$

já que a curtas distâncias ( $r \approx 0$ ), (3.85) e (3.86) são aproximadamente equivalentes. Neste caso, a atratividade  $\beta$  poderá ser aproximada a

$$\beta = \frac{\beta_0}{\gamma r^2 + 1} \quad (3.87)$$

---

<sup>13</sup> Um exemplo de uma linha em código MATLAB® para a implementação do termo de aleatoriedade  $\alpha \epsilon_i$  poderá ser: `alfa = 0.2; alfa * 0.05 * (valor_max - valor_min) * unifrnd(-1, +1, [1 numero_variaveis])`.

<sup>14</sup> Os voos de Lévy (Yang, 2010a) são processos de Markov (Bharucha-Reid, 1997), que se caracterizam por produzirem trajetórias curtas e longas, maioritariamente curtas, descrevendo, por exemplo, os movimentos de animais na procura de alimento.

A convergência do método de otimização baseado no Algoritmo dos Pirlampos pode ser melhorada, se o parâmetro de aleatoriedade  $\alpha$  de (3.84) for decrescendo à medida que a solução ótima se aproxime. Uma função  $\alpha(iter)$  para o parâmetro de aleatoriedade pode ser definida por

$$\alpha(iter) = \alpha_0 v^{iter} \quad (3.88)$$

com o número da iteração  $iter \in [1, max\_iter]$  e  $v \in [0, 1]$  um fator de redução da aleatoriedade. Outra variante que poderá melhorar a convergência do Algoritmo dos Pirlampos (FA) será incorporar o conceito PCA no algoritmo FA (Palma et al., 2017). Um pirlampo adicional influenciado pelas melhores trajetórias dos pirlampos é incorporado no enxame, de modo a tentar influenciá-lo.

### 3.4.5.2 Sintonia de um controlador proporcional, integral e derivado

Existem diversos métodos tradicionais para a sintonia de controladores PID, tais como o método com base no *root-locus*, o método da sensibilidade limite, os métodos de Ziegler-Nichols, de Cohen-Coon e o método do relé. As técnicas meta-heurísticas de otimização inspiradas na natureza aplicadas ao projeto de controladores PID estão atualmente a suscitar um elevado interesse.

O Algoritmo dos Pirlampos começa por criar uma população inicial de pirlampos, cujas posições aleatórias iniciais no espaço de procura sejam viáveis. O espaço de procura para a sintonia de um controlador PID encontra-se contido no Espaço Tridimensional ( $d = 3$ ), correspondendo os parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  do controlador às coordenadas no Espaço Tridimensional que garantem a melhor solução do sistema resultante, face às restrições e às especificações<sup>15</sup> de desempenho adotadas. Cada pirlampo move-se no espaço de procura 3D predefinido com uma determinada atratividade, atualizada tendo em conta as propriedades desse pirlampo e dos pirlampos adjacentes. Diversos estudos (Bendjehaba et al., 2013; Kumanan & Nagaraj, 2013; Rukslin et al., 2016) revelaram que a eficiência deste método de sintonia é superior ao método de Ziegler-Nichols.

### 3.4.6 Conceção de controladores em sistemas humano-máquina

A conceção de controladores em *software* recorre às ferramentas de desenvolvimento LabVIEW®, MATLAB®/Simulink® e ARDUINO® IDE. Atualmente existem diversas soluções comerciais para a implementação em *hardware* de controladores de assistência, nomeadamente a utilização de *Field-Programmable Gate Arrays* (FPGAs) (Li et al. 2003), microcontroladores e Computadores de Placa Única (SBCs) (Yang et al. 2010; Evans et al. 2013; Molloy 2014). Neste trabalho optou-se pelo recurso a microcontroladores ARM® de 32 *bits*, designadamente SAM3X8E (plataforma ARDUINO® Due) e MK20DX256VLH7, tendo em conta o baixo custo e consumo, as reduzidas dimensões e a elevada versatilidade. Estes microcontroladores possuem memórias *flash* de programa de 512 kB e de 256 kB, respetivamente.

<sup>15</sup> Tais como os tempos de subida, de estabelecimento e a sobre-elevação da resposta do sistema resultante em anel fechado ao degrau unitário. As restrições (ex: garantir a estabilidade em anel fechado) e as especificações de desempenho poderão ter ainda em consideração a análise das respostas Ponto-a-Ponto sem controlador, obtidas por um operador especialista. A função MATLAB® *stepinfo()* devolve uma estrutura contendo as propriedades da resposta ao degrau unitário de um sistema Linear Invariante no Tempo.

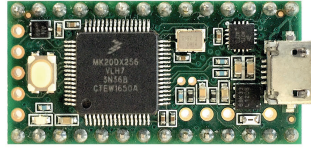


Figura 3.17: Placa de Circuito Impresso (PCB) contendo o microcontrolador ARM® Cortex®-M4 MK20DX256VLH7 (NXP-Freescale®), de 72 MHz (frequência de relógio ajustável). As dimensões são de  $36 \times 18$  mm.

A implementação do controlador de assistência no *hardware*<sup>16</sup> pode ser efetuada programando o microcontrolador utilizado ou ainda, no caso do ARDUINO® Due, através de modelos Simulink®.

#### 3.4.6.1 Projeto baseado em modelos Simulink®

A técnica do projeto baseado em modelos Simulink® (figuras 3.18 e 3.19) veio alterar o paradigma da programação dos microcontroladores e dos Computadores de Placa Única.

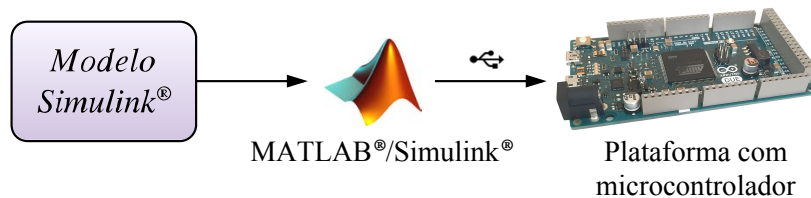


Figura 3.18: Ilustração do projeto baseado em modelos.

O código pode ser automaticamente gerado a partir de um modelo Simulink®, sendo posteriormente carregado numa placa de desenvolvimento dedicada<sup>17</sup>, poupando tempo e evitando erros de programação. A ferramenta MATLAB®/Simulink® (Moler, 2011; Chapman, 2008) permite dois modos distintos de programação: o modo normal e o modo externo. O modo normal possibilita o carregamento de um modelo Simulink® no microcontrolador de uma plataforma ARDUINO® (Blum, 2013; Margolis, 2011), para operação autónoma a uma frequência predefinida de funcionamento, tipicamente até 100 Hz. Por sua vez, o modo externo permite captar e mostrar os sinais de informação e de controlo diretamente através do Simulink®.

### 3.5 Análise de desempenho dos sistemas humano-máquina

Uma definição possível para perícia é «a capacidade de realização de uma determinada tarefa com rapidez e erro mínimo, e um plano ótimo de resolução» (Suzuki, 2010), enquanto que o desempenho poderá estar relacionado com o mérito da execução desse tipo de ação. Assim, é geralmente

<sup>16</sup> A plataforma ARDUINO® permite a programação em linguagem C, através de um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE). A Programação Série no Circuito (ICSP) dos microcontroladores SAM3X8E e MK20DX256VLH7 pode ser feita através da porta USB ou via Interface Série de Periféricos (SPI). A placa de desenvolvimento ARDUINO® Due (figura 3.18) possibilita a geração automática de código e o seu carregamento, tendo em conta o projeto baseado em modelos Simulink® (MathWorks®, 2018).

<sup>17</sup> Ex: ARDUINO® Due (figuras 2.12 e 3.18), Raspberry Pi® ou BeagleBone™ Black (figura 2.13).



Figura 3.19: Controladores de assistência e de aquisição em Tempo-Real para tarefas de condução, implementados tendo em conta o paradigma do projeto baseado em modelos Simulink® (Antunes et al., 2015; Antunes et al., 2017).

aceite na literatura que o termo desempenho é confiante na qualidade da saída, enquanto que o termo perícia é mais específico ao método de realização. A melhoria da perícia pode ser alcançada através do processo de aprendizagem humana, tendo como consequência o aumento do desempenho. Diversas medidas para a quantificação do desempenho foram propostas em (Parthornratt et al., 2011; Sasaki et al., 2007; Suzuki & Harashima, 2008; Tervo et al., 2010a), consistindo num misto de eficiência, complexidade de sequência, planeamento e grau de dificuldade.

No projeto de controlo da HAM, o conceito de índice de desempenho encontra-se muitas vezes associado ao desempenho do operador numa dada tarefa. Tal sucede porque o ganho global de desempenho é geralmente mais importante do que o modo utilizado para completar a tarefa. Os métodos tradicionais para medir desempenho tomam frequentemente em consideração a exatidão e/ou a acuidade, que dependem do tipo de Interface Humano-Máquina e do tipo de tarefas. No entanto, a quantidade de esforço humano terá também de ser equacionada para a quantificação do desempenho global, já que esta influenciará o cansaço do operador durante a tarefa manual.

Na utilização pelo ser humano das máquinas e equipamentos, encontram-se normalmente envolvidas diversas ações voluntárias com um certo alcance de movimento, em tarefas Ponto-a-Ponto, conforme descrito na subsecção 3.5.1 e no capítulo 4 (subsecção 4.4.4 e secção 4.6).

### 3.5.1 Análise de desempenho baseada na lei de Fitts

A lei de Fitts (Fitts, 1992) consiste numa relação matemática que permite modelar o compromisso velocidade-exatidão nos movimentos humanos de alcance rápido, como por exemplo o movimento manual que se inicia numa dada localização espacial e termina após se alcançar um determinado alvo (figura 3.20). Esta lei é aplicada para a estimação do comportamento psicomotor humano e para a validação do desempenho no projeto de Interfaces Humano-Máquina.

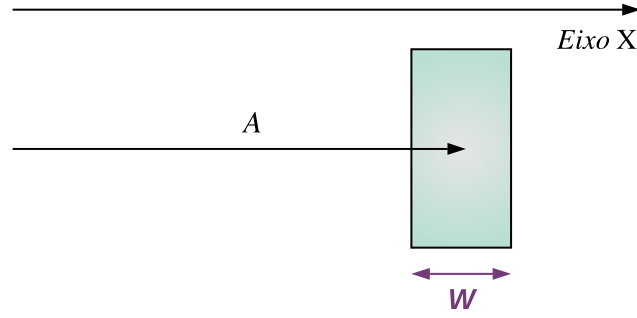


Figura 3.20: Ação Ponto-a-Ponto (PTP) no Espaço Unidimensional (1D).

De acordo com a lei de Fitts, a duração temporal  $M_T$  do movimento resultante pode ser obtida através de

$$M_T = a + b \log_2 \left( \frac{2A}{W} + c \right) \quad (3.89)$$

onde  $a$  e  $b$  (interseção e declive) são constantes empíricas da interface, obtidas por regressão linear, e  $c$  é uma constante de valor fixo (0; 0,5 ou 1). O Índice de Desempenho do Operador Humano (HPI) relativo à taxa de processamento de informação no movimento de aproximação ao alvo, designado de  $I_{P_{PTP}}$ , é definido em (3.90) por

$$I_{P_{PTP}} = \frac{1}{b} \quad (3.90)$$

A lei de Fitts possibilita estimar o tempo que um ser humano, utilizando uma determinada interface, demora na execução de uma tarefa Ponto-a-Ponto. A exatidão da tarefa motora encontra-se dependente da largura  $W$  do alvo a atingir (figura 3.20), enquanto que o índice de dificuldade  $I_D$  representa a informação processada pelo cérebro humano, sendo definido por

$$I_D = \log_2 \left( \frac{2A}{W} + c \right) \quad (3.91)$$

e portanto

$$M_T = a + b I_D \quad (3.92)$$

Esta lei determina que a duração do movimento  $M_T$  é afetada pela distância  $A$  ao alvo e pela exatidão  $W$ , consistindo num modelo de regressão linear entre a duração do movimento  $M_T$  e o índice de dificuldade  $I_D$ , conforme (3.92). Embora a formulação padrão de Fitts em (3.89) com  $c = 0$  e a formulação de Welford ( $c = 0,5$ ) nem sempre garantam índices de dificuldade positivos, a formulação de Shannon ( $c = 1$ ) assegurará sempre um valor positivo para  $I_D$  (3.91). Adotando como exemplo a formulação de Welford, resultará um valor de  $I_D$  negativo para  $A/W < 0,25$ . Como os alvos menores situados a maiores distâncias demoram mais tempo a serem atingidos do que os alvos maiores localizados a menores distâncias, esta lei sugere, por exemplo, que no projeto de Interfaces Gráficas do Utilizador (GUIs) os componentes mais utilizados <sup>18</sup> devem

<sup>18</sup> Como botões, ícones, janelas e barras de deslocamento, também designados de *widgets* na terminologia anglo-saxónica.

possuir maiores dimensões e estar mais próximos da posição do cursor.

Na figura 3.21 é apresentado o diagrama conceptual do modelo de desempenho tendo por base a lei de Fitts, sendo  $M_T$  a duração temporal de uma ação de movimento para um determinado alvo, de largura  $W$ , localizado a uma certa distância  $A$ , conforme ilustra a figura 3.20.  $I_{P_{PTP}}$  é o índice de desempenho correspondente à taxa de processamento de informação no movimento de aproximação ao alvo e  $I_D$  o índice de dificuldade relacionado com a informação processada pelo cérebro humano.

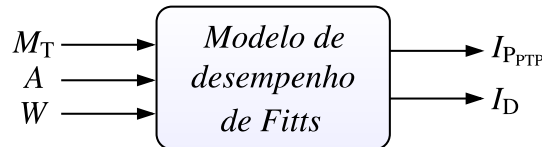


Figura 3.21: Diagrama conceptual do modelo de desempenho baseado na lei de Fitts, para a realização de uma tarefa Ponto-a-Ponto.

### 3.5.1.1 Extensão da lei de Fitts para tarefas multidimensionais

A lei de Fitts gera um modelo bastante preciso em experiências motoras sobre uma linha reta. Embora se aplique para o movimento numa única dimensão, esta lei consegue ainda assim caracterizar respostas bidimensionais simples (figura 3.22), como a resposta da mão humana. Com o aparecimento das Interfaces Gráficas do Utilizador, a lei de Fitts tem sido também aplicada às tarefas motoras que envolvem os movimentos do cursor no ecrã do computador, podendo caracterizar as ações de arrastar e soltar, e de assinalar e clicar. Além disso, as mesmas tarefas realizadas com recurso a outras partes do corpo, como por exemplo os pés e a cabeça, também verificam esta lei.

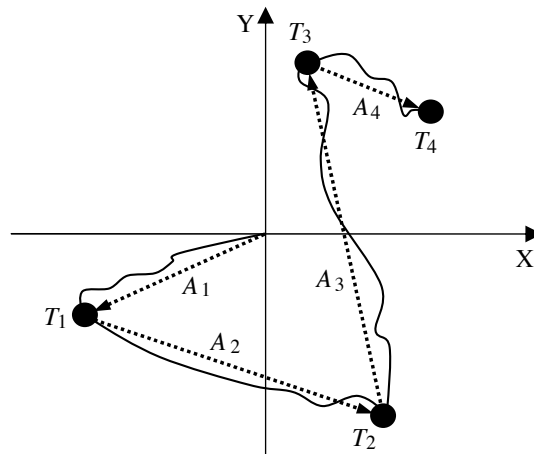


Figura 3.22: Representação no Espaço Bidimensional de uma sequência de quatro tarefas Ponto-a-Ponto, sendo  $A_p$  a distância respetiva do alvo  $T_p$  ao alvo  $T_{p-1}$ .

Estudos realizados por MacKenzie & Buxton (1992) propuseram a generalização da lei de Fitts para tarefas de deslocação Ponto-a-Ponto (PTP) no Espaço Bidimensional (2D), em diversos

sistemas de interação humano-computador, visando por exemplo a predição do tempo de deslocação entre a posição inicial e a posição de destino do cursor. Para os movimentos realizados no Espaço Bidimensional é frequentemente considerada a interpretação da largura do alvo circular (figura 3.23). Esta abordagem mantém a unidimensionalidade da lei de Fitts (3.89), tendo em conta que a largura (diâmetro) da circunferência é constante e independente do ângulo de aproximação do movimento.

Os valores dos parâmetros  $a$  e  $b$  de (3.89), relativos à interseção e ao declive do modelo de desempenho de Fitts, podem ser obtidos através de regressão linear, considerando a interpretação da largura do alvo circular.

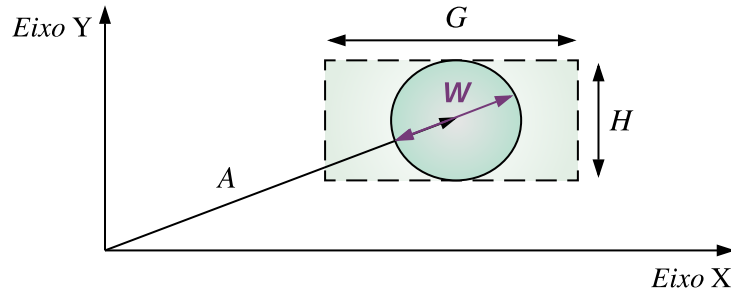


Figura 3.23: Ação Ponto-a-Ponto no Espaço Bidimensional.

O procedimento de validação experimental proposto neste trabalho para os modelos baseados na lei de Fitts (Antunes et al., 2013b), toma em consideração o coeficiente de determinação  $R^2$  da duração temporal dos movimentos de aproximação aos alvos, obtido para uma dada sequência de tarefas Ponto-a-Ponto com o total de  $L$  alvos a atingir, sendo  $\widehat{M}_{Tp}$  e  $\overline{M}_T$  respetivamente o valor estimado através de regressão linear da duração do movimento para cada alvo  $p$ , e o valor médio da duração dos movimentos Ponto-a-Ponto (PTP). O coeficiente de determinação  $R^2$ , definido em (3.93), pode ser utilizado para a validação da lei de Fitts, assim como o valor calculado do desvio padrão entre a duração do movimento atual e a duração estimada do movimento através da lei de Fitts.

$$R^2 = \frac{\sum_{p=1}^L (\widehat{M}_{Tp} - \overline{M}_T)^2}{\sum_{p=1}^L (M_{Tp} - \overline{M}_T)^2} = 1 - \frac{\sum_{p=1}^L (M_{Tp} - \widehat{M}_{Tp})^2}{\sum_{p=1}^L (M_{Tp} - \overline{M}_T)^2} \quad (3.93)$$

Existem outras interpretações de modelagem do desempenho que utilizam a forma do alvo (Fitts, 1992), como a baseada no conceito do “menor dos modelos”, que assume a menor das dimensões do alvo (se o comprimento ou a altura), ou a interpretação  $W'$ , que utiliza a largura do alvo juntamente com o vetor de aproximação. Outra extensão proposta à lei de Fitts é a lei de Accot-Zhai, aplicada para tarefas de condução a duas dimensões (Accot & Zhai, 2003), e a lei de Hick, que permite modelar o tempo de tomada da decisão de um utilizador humano (Revelt, 2008). Uma extensão à lei de Fitts (3.89) que recorre ao sistema de coordenadas esféricas e que pode ser aplicada para certos movimentos no Espaço Tridimensional (3D) é proposta em Cha & Myung (2013).



### 3.5.1.2 Índice de desempenho para um conjunto de tarefas Ponto-a-Ponto

Sendo a lei de Fitts utilizada para prever a duração de muitas operações manuais Ponto-a-Ponto (figura 3.22), qualquer avaliação do desempenho humano-máquina correspondente irá inevitavelmente depender da velocidade e da exatidão. A velocidade média  $\bar{S}_{PTP}$  para este tipo de tarefas é definida por

$$\bar{S}_{PTP} = \frac{\sum_{p=1}^{N_{PTP}} A_p}{T_{PTP}} \quad (3.94)$$

sendo  $A_p$  a distância do alvo para a tarefa Ponto-a-Ponto  $p$ ,  $N_{PTP}$  o número total de tarefas consecutivas Ponto-a-Ponto e  $T_{PTP}$  a duração temporal total, dada por (3.95), para completar o conjunto das  $N_{PTP}$  tarefas.

$$T_{PTP} = \sum_{p=1}^{N_{PTP}} T_p \quad T_p \leq T_m \quad (3.95)$$

$T_p$  é o tempo de realização pelo operador humano da tarefa Ponto-a-Ponto  $p$  e  $T_m$  é o limite de tempo máximo permitido para a execução dessa tarefa. Para o caso particular de distâncias sempre constantes a cada alvo, uma condição proposta para  $T_m$  será dada por

$$T_m \geq \frac{T_{PTP}}{N_{PTP}} \quad (3.96)$$

Para as tarefas Ponto-a-Ponto no Espaço Bidimensional normalizado, cujas distâncias aos alvos (de idêntica dimensão) variam, é proposto em Antunes et al. (2013b) o índice de desempenho  $J_{PTP}$ , definido por

$$J_{PTP} = \left(1 - \frac{\bar{\delta}^2}{8}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{M_{PTP}}{N_{PTP}}}\right) \bar{S}_{PTP} = \left(1 - \frac{\bar{\delta}^2}{8}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{M_{PTP}}{N_{PTP}}}\right) \left(\frac{\sum_{p=1}^{N_{PTP}} A_p}{\sum_{p=1}^{N_{PTP}} T_p}\right) \quad (3.97)$$

para um total de  $N_{PTP}$  tarefas consecutivas.  $M_{PTP}$  é o número total de tarefas não cumpridas dentro de um tempo limite predefinido, sendo  $\bar{\delta}^2$  o valor médio do desvio quadrático ao alvo. O desvio  $\delta$  máximo admissível ao alvo é  $2\sqrt{2}$ , correspondendo à distância entre as coordenadas limites  $(-1, -1)$  e  $(1, 1)$ , sendo nessa situação  $\delta^2 = 8$ .

## 3.5.2 Medidas de desempenho baseadas na exatidão e no esforço

Qualquer critério proposto baseado no desempenho de uma tarefa de seguimento manual em perseguição terá de tomar em consideração variáveis como a exatidão, a acuidade e também uma medida do esforço requerido pelo operador para a realização da tarefa. Assim, para a obtenção do índice de desempenho de seguimento  $T_{ms}$  da figura 3.24, são introduzidas três medidas (Antunes et al., 2013a): para a quantificação da exatidão é proposto o erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$  entre o sinal de seguimento de entrada e o correspondente sinal de resposta; para a medida do esforço do operador humano, ou seja, da força e do movimento associados à utilização da

interface, é proposta a deformação quadrática média  $M_{QD}$  e o valor total do movimento cartesiano dividido pela duração da experiência,  $T_{MD}$ .

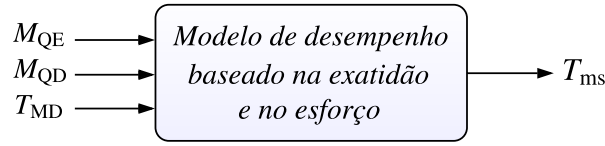


Figura 3.24: Diagrama conceitual do modelo de desempenho, tendo por base as medidas da exatidão e do esforço.

### 3.5.2.1 Erro quadrático cartesiano médio

O erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$  obtém-se a partir de todos os valores instantâneos da posição do alvo  $\mathbf{x}(k)$  e das correspondentes respostas de seguimento  $\mathbf{y}(k)$ , tomando como exemplo o Espaço Bidimensional. Assim, será definido por

$$M_{QE} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{(y_x(k) - x_x(k))^2 + (y_y(k) - x_y(k))^2} \quad (3.98)$$

$$\mathbf{x}(k) = (x_x(k), x_y(k)) \quad (3.99)$$

$$\mathbf{y}(k) = (y_x(k), y_y(k)) \quad (3.100)$$

$$N = 1 + F_s T_e \quad (3.101)$$

sendo  $x_x(k)$  e  $x_y(k)$  as referências de seguimento no instante  $k$  para o plano cartesiano (3.99),  $y_x(k)$  e  $y_y(k)$  as respostas de seguimento correspondentes (3.100),  $T_e$  a duração da experiência,  $N$  o número total de amostras e  $F_s$  a frequência de amostragem (3.101). Para sistemas com Uma Entrada e Uma Saída (SISO), o erro quadrático médio é designado por erro absoluto médio, sendo dado por

$$M_{QE} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{(y_x(k) - x_x(k))^2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |y_x(k) - x_x(k)| \quad (3.102)$$

### 3.5.2.2 Deformação quadrática média

A deformação quadrática média  $M_{QD}$ , considerando o Espaço Bidimensional, é obtida por

$$M_{QD} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{(d_x(k))^2 + (d_y(k))^2} \quad (3.103)$$

com os valores instantâneos da deformação  $\mathbf{d}(k)$  expressos por

$$\mathbf{d}(k) = (d_x(k), d_y(k)) \quad (3.104)$$

sendo  $d_x(k)$  e  $d_y(k)$  (3.103) e (3.104) as deformações cartesianas da Interface Humano-Máquina, no instante  $k$ . Para os sistemas SISO, a deformação quadrática média é designada por deformação absoluta média, sendo definida por

$$M_{QD} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{(d_x(k))^2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |d_x(k)| \quad (3.105)$$

### 3.5.2.3 Celeridade cartesiana

Considerando como exemplo o Espaço Bidimensional, a celeridade cartesiana  $T_{MD}$  é definida como o quociente entre o valor absoluto total do movimento e a duração da experiência, ou seja

$$T_{MD} = \frac{\sum_{k=2}^N \sqrt{(d_x(k) - d_x(k-1))^2 + (d_y(k) - d_y(k-1))^2}}{(N-1)T_s} \quad (3.106)$$

Para os sistemas SISO a celeridade é definida por

$$T_{MD} = \frac{\sum_{k=2}^N \sqrt{(d_x(k) - d_x(k-1))^2}}{(N-1)T_s} = \frac{\sum_{k=2}^N |d_x(k) - d_x(k-1)|}{(N-1)T_s} \quad (3.107)$$

### 3.5.2.4 Generalização das medidas de desempenho para o Espaço Tridimensional

A generalização para o Espaço Tridimensional das medidas de desempenho de (3.98), (3.103) e (3.106) é dada, respetivamente, por

$$M_{QE} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{(y_x(k) - x_x(k))^2 + (y_y(k) - x_y(k))^2 + (y_z(k) - x_z(k))^2} \quad (3.108)$$

$$M_{QD} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{(d_x(k))^2 + (d_y(k))^2 + (d_z(k))^2} \quad (3.109)$$

$$T_{MD} = \frac{\sum_{k=2}^N \sqrt{(d_x(k) - d_x(k-1))^2 + (d_y(k) - d_y(k-1))^2 + (d_z(k) - d_z(k-1))^2}}{(N-1)T_s} \quad (3.110)$$

### 3.5.2.5 Índice de desempenho baseado na exatidão e no esforço

Um índice de desempenho genérico  $T_{ms}$  (figura 3.24), associado às tarefas de seguimento que requerem exatidão e esforço, pode ser definido, a partir de (3.98), (3.103) e (3.106), por

$$T_{ms} = \alpha_D M_{QE} + \beta_D M_{QD} + \gamma_D T_{MD} \quad (3.111)$$

com

$$\alpha_D + \beta_D + \gamma_D = 1 \quad (3.112)$$

As constantes reais não negativas  $\alpha_D$ ,  $\beta_D$  e  $\gamma_D$  de (3.111) e (3.112) representam os pesos associados a cada uma das medidas propostas.

### 3.5.3 Medidas de desempenho em tecnologia assistiva

Em tecnologia assistiva, designadamente nos sistemas de acesso ao computador <sup>19</sup>, é introduzido em Antunes et al. (2016) o modelo corrente de desempenho, cujo diagrama conceptual é:

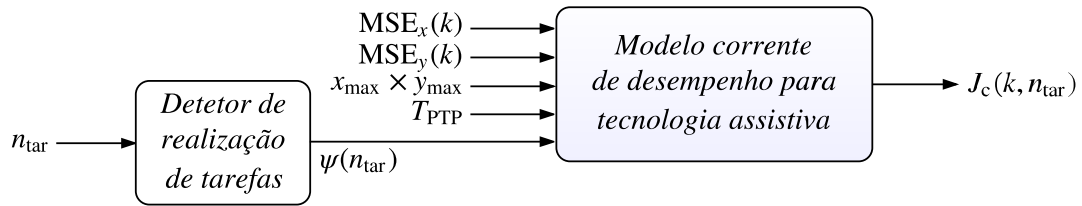


Figura 3.25: Diagrama de blocos conceptual do modelo corrente de desempenho para tecnologia assistiva.

Em tarefas Ponto-a-Ponto aleatórias, através de um ecrã do monitor, a função incremental de custo  $J_c(k, n_{tar})$  (figura 3.25) é definida por

$$J_c(k, n_{tar}) = \frac{MSE_x(k) + MSE_y(k)}{\beta_F x_{max} y_{max} n_{tar} T_{PTP}} \psi(n_{tar}) \quad (3.113)$$

O índice de desempenho atual será inversamente proporcional à função de custo  $J_c(k, n_{tar})$ , onde  $T_{PTP}$  é a duração em segundos da posição (aleatória) de cada alvo de dimensão fixa,  $n_{tar}$  é o número da tarefa Ponto-a-Ponto atual,  $k$  é a amostra atual e  $\beta_F$  é um parâmetro real de projeto, para uma resolução do ecrã de  $x_{max} \times y_{max}$  pixels (px). O termo  $\psi(n_{tar})$  (figura 3.25) associado à taxa de sucesso das tarefas Ponto-a-Ponto, proposto em Antunes et al. (2016), é dado por

$$\psi(n_{tar}) = 1 + \gamma_F \log_2 \left( \alpha_F + \sqrt{\frac{M(n_{tar})}{n_{tar}}} \right) \quad (3.114)$$

sendo  $M(n_{tar})$  o número acumulado de alvos não atingidos durante a experiência de seguimento Ponto-a-Ponto e  $\alpha_F$  e  $\gamma_F$  parâmetros reais de projeto (3.114). Os erros quadráticos médios  $MSE_x(k)$  e  $MSE_y(k)$  de (3.113), para uma janela deslizante de tamanho  $w_d$ , são respetivamente obtidos por

$$MSE_x(k) = \frac{\sum_{v=k-w_d+1}^k (E_x(v))^2}{w_d} \quad (3.115)$$

<sup>19</sup> Nestes casos a referência pode não ser facilmente determinável à partida, sendo que existem também diferentes ações para o acesso ao computador. A lei de Fitts (3.89) poderá aplicar-se ainda assim em diferido nos movimentos de acesso a alvos (figura 3.23) com a relação  $A/W$  conhecida.

e

$$\text{MSE}_y(k) = \frac{\sum_{v=k-w_d+1}^k (E_y(v))^2}{w_d} \quad (3.116)$$

onde  $E_x(k)$  e  $E_y(k)$  são os erros de controlo para os eixos das abcissas (X) e das ordenadas (Y), respetivamente definidos por

$$E_x(k) = T_x(k) - P_x(k) \quad (3.117)$$

$$E_y(k) = T_y(k) - P_y(k) \quad (3.118)$$

sendo  $(T_x(k), T_y(k)) = \mathbf{t}_{x,y}(k)$  e  $(P_x(k), P_y(k)) = \mathbf{p}_{x,y}(k)$  as coordenadas respetivas do alvo  $T$  e da posição  $P$  que resulta da ação do operador através de uma interface considerada, para a amostra  $k$ .

Para as tarefas PTP onde a distância face a cada alvo, de igual dimensão, é constante <sup>20</sup>, é proposta em Antunes et al. (2016) uma arquitetura simplificada, para a obtenção da função de custo  $J_c(n_{\text{tar}})$  (figura 3.26), após um total de  $n_{\text{tar}}$  tarefas executadas.

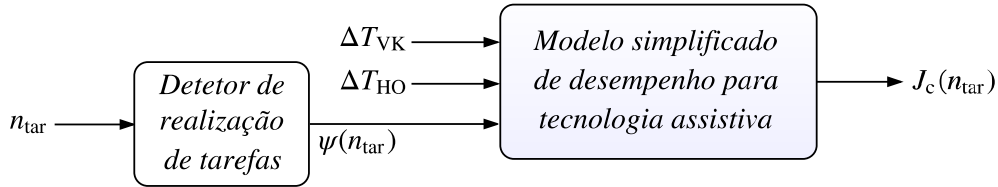


Figura 3.26: Diagrama conceitual do modelo simplificado de desempenho para tecnologia assistiva, em tarefas Ponto-a-Ponto onde a distância a cada alvo, de igual dimensão, é constante.

Com

$$J_c(n_{\text{tar}}) = \frac{\Delta T_{\text{VK}} - \Delta T_{\text{HO}}}{\Delta T_{\text{HO}}} \psi(n_{\text{tar}}) \quad (3.119)$$

sendo o índice de desempenho para este tipo de tarefas inversamente proporcional a  $J_c(n_{\text{tar}})$  (3.119),  $\Delta T_{\text{VK}}$  a duração, por exemplo, da escrita com um teclado virtual e uma dada interface, e  $\Delta T_{\text{HO}}$  a duração ideal da escrita. Outra metodologia proposta para a avaliação do desempenho tem como suporte a Análise em Componentes Principais (PCA).

### 3.5.4 Análise de desempenho com base em componentes principais

Existem diversos métodos estatísticos que podem ser aplicados para a análise do desempenho dos sistemas humano-máquina (Chiang et al., 2001; Jackson, 1991; Jolliffe, 2010). Estes métodos incluem a Análise em Componentes Principais (PCA), os Mínimos Quadrados Parciais (PLS) e a Regressão de Componentes Principais (PCR). Neste trabalho é dado especial enfoque à técnica de PCA (Jackson, 1991; Jolliffe, 2010; Chiang et al., 2001; Palma et al., 2010; Palma et al., 2005).

O diagrama conceitual do modelo PCA de análise de desempenho proposto é ilustrado na figura 3.27, sendo  $r_x(k)$  e  $r_y(k)$  respetivamente os sinais discretos de referência para os eixos X e

<sup>20</sup> Por exemplo, a escrita da mesma frase através de um teclado virtual.

Y, no instante  $k$ , e  $y_x(k)$  e  $y_y(k)$  os correspondentes sinais de resposta do operador humano, para os eixos X e Y, no instante  $k$ . Considerando, como exemplo, duas Componentes Principais,  $t_1$  e  $t_2$  corresponderão às projeções no plano dessas Componentes Principais.

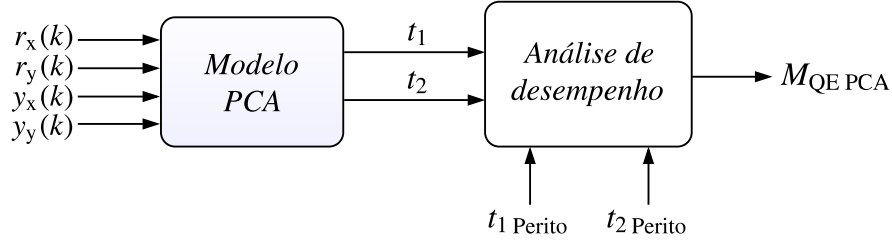


Figura 3.27: Diagrama conceptual do modelo PCA de análise de desempenho.

O índice de desempenho PCA proposto em Antunes et al. (2014), para uma experiência de seguimento realizada por um operador humano, toma em conta o erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$  em relação à projeção PCA dos dados do operador perito ou especialista, de referência, no espaço de projeções no plano das Componentes Principais utilizadas, e a variação do erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$  face às mesmas tarefas realizadas por diferentes operadores com níveis de desempenho distintos. O índice de desempenho  $M_{QEPCA}$  (figura 3.27) é obtido de maneira análoga a (3.98), tendo em consideração as projeções  $op_{t_1, t_2}$  dos dados do operador e as projeções  $pe_{t_1, t_2}$  dos dados do operador perito no espaço de pontuações.

$$M_{QEPCA} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{(op_{t_1}(k) - pe_{t_1}(k))^2 + (op_{t_2}(k) - pe_{t_2}(k))^2} \quad (3.120)$$

### 3.5.4.1 Modelagem PCA

Os modelos de Análise em Componentes Principais podem ser obtidos para a identificação de processos e controlo, e ainda para a compressão de dados e para o diagnóstico de falhas. O procedimento para análise do desempenho (Antunes et al., 2014), utiliza uma matriz de dados  $\mathbf{X}$ , construída a partir da geração de sinais alvo  $\mathbf{r}(k)$  para os eixos X e Y, com média centrada na origem, sendo a resposta correspondente do sistema humano-máquina para cada amostra  $k$ , obtida por

$$\mathbf{X}(k, :) = \begin{bmatrix} r_x(k) & r_y(k) & y_x(k) & y_y(k) \end{bmatrix} \quad (3.121)$$

$$\mathbf{r}(k) = \begin{bmatrix} r_x(k) & r_y(k) \end{bmatrix} \quad (3.122)$$

Dado que a resposta de controlo da Interface Humano-Máquina segue os sinais de alvo  $\mathbf{r}(k)$  com média centrada na origem (3.122), uma matriz aproximada  $\mathbf{S}$  de covariância de amostras poderá ser obtida a partir da matriz de dados  $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{n \times m}$  de (3.121), conforme

$$\mathbf{S} = \frac{1}{n-1} \mathbf{X}^T \mathbf{X} \quad (3.123)$$

sendo  $n$  o número de amostras (linhas da matriz de dados  $\mathbf{X}$ ) e  $m$  o número de variáveis de processo (colunas da matriz de dados  $\mathbf{X}$ ). O método PCA (Palma et al., 2010) calcula os vetores ortogonais ordenados pela quantidade de variância nas direções do vetor de carregamento, retendo a variabilidade dos dados escalados  $\mathbf{X}$ . Estes vetores singulares (colunas da matriz  $\mathbf{V}$ ) são obtidos através da Decomposição em Valores Singulares (SVD) (Chiang et al., 2001; Jackson, 1991; Jolliffe, 2010) da matriz de covariância  $\mathbf{S}$ , dada por (3.123) e por

$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T \quad (3.124)$$

A matriz diagonal  $\mathbf{\Lambda}$  de valores singulares  $\lambda_i$  de amplitude decrescente, com o número de variáveis de processo  $m = 4$  é expressa por

$$\mathbf{\Lambda}_{m=4} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \lambda_3 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_{m=4} \end{bmatrix} \quad (3.125)$$

$$\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{m=4} \geq 0 \quad (3.126)$$

sendo  $\mathbf{\Lambda}$  a matriz (3.125) cujos valores diagonais são os valores singulares (3.126) que correspondem a cada vetor singular. A construção de uma projeção dimensionalmente reduzida da matriz de dados  $\mathbf{X}$  é obtida através da escolha na matriz  $\mathbf{\Lambda}$  dos maiores valores singulares e dos correspondentes vetores singulares. Os vetores ortogonais associados aos maiores valores singulares calculados irão captar a informação dos dados mais relevante. Estas Componentes Principais, calculadas de acordo com uma certa variância (Chiang et al., 2001; Jackson, 1991; Jolliffe, 2010), deverão ser retidas no modelo PCA de modo a captar, de forma ótima, as variações dos dados, e ainda para minimizar o ruído do modelo.

Assumindo  $a_{PC} \leq n$  o número de Componentes Principais utilizadas, a matriz de carregamento  $\mathbf{P}$  e a matriz de pontuações  $\mathbf{T}$  são respetivamente definidas por

$$\mathbf{P} = \mathbf{V}(:, 1 : a) \quad (3.127)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{X} \mathbf{P} \quad (3.128)$$

A matriz de reconstrução  $\widehat{\mathbf{X}}$  dos dados no espaço  $m$  das observações é calculada a partir de (3.127) e (3.128), através de

$$\widehat{\mathbf{X}} = \mathbf{T} \mathbf{P}^T \quad (3.129)$$

Atendendo a (3.121) e a (3.129), a matriz residual  $\mathbf{E}$  é definida por

$$\mathbf{E} = \mathbf{X} - \widehat{\mathbf{X}} \quad (3.130)$$

A matriz residual  $E$  de (3.130) dá uma medida do erro associado ao modelo PCA para cada experiência. A qualidade do modelo PCA depende do número total de Componentes Principais utilizadas, sendo calculada através da soma normalizada dos valores singulares da matriz  $\mathbf{A}$ , conforme a tabela 3.1.

Tabela 3.1: Qualidade do modelo PCA para  $m = 4$ .

Número de Componentes Principais			
1	2	3	4
$\frac{\lambda_1}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i}$	$\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i}$	$\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i}$	$\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i} = 1$



## Capítulo 4

# Resultados experimentais e validação

*Conta o que é contável, mede o que é mensurável e torna mensurável o que não o é.*

Galileu Galilei (1564 - 1642)

### Sumário

4.1	Aquisição de dados . . . . .	77
4.2	Classificação de frequências e aprendizagem supervisionada . . . . .	79
4.3	Seguimento unidimensional . . . . .	86
4.4	Seguimento multidimensional . . . . .	101
4.5	Controlo assistido e transferência de conhecimento . . . . .	123
4.6	Projeto de sistemas de controlo para tecnologia assistiva . . . . .	139

### Resumo

Neste capítulo são apresentados os principais resultados experimentais relativos a modelos de sinais e modelos de sistemas, considerando diversos tipos de tarefas com Interfaces Humano-Máquina, realizadas por utilizadores humanos sem controlador e com controlador de assistência. São validados diversos sistemas de controlo para interação humano-máquina, bem como um protótipo de *hardware* e de *software* inovador, desenvolvido para tecnologia assistiva.

### 4.1 Aquisição de dados

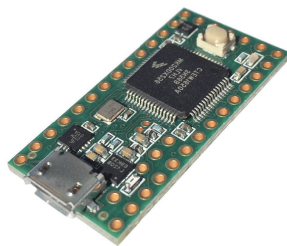
Neste trabalho foram desenvolvidos diversos Sistemas de Aquisição de Dados (DAQs). Um dos sistemas de aquisição concebidos (Antunes et al., 2017) utiliza o projeto baseado em modelos, sendo desenvolvido em MATLAB®/Simulink® (Moler, 2011; Moler, 2004; Hunt et al., 2006) e implementado na plataforma ARDUINO® Due, possibilitando dois modos de comunicação série: a comunicação através de cabo USB ou a comunicação sem fios. A comunicação série sem fios *Bluetooth*® (BT) <sup>1</sup> utiliza o módulo encapsulado RN-42 da Roving Networks (Microchip®) (figura 4.1), configurado para o Perfil de Porta Série (SPP).

<sup>1</sup> Também designado na terminologia anglo-saxónica por *Bluetooth*® *Serial*.

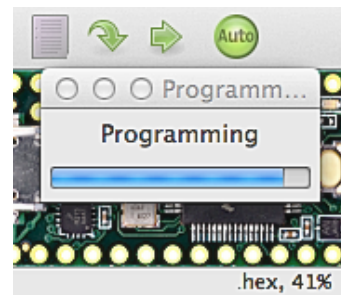


Figura 4.1: Módulo *Bluetooth*® RN-42, utilizado na aquisição de dados.

O Sistema de Aquisição de Dados (DAQ) com transmissão série, implementado no microcontrolador MK20DX256VLH7 (figura 4.2.a) foi desenvolvido em linguagem C. A gravação em ficheiro, dos dados relativos às experiências é efetuada através das ferramentas Tera Term (Windows®) e ZOC (macOS®). A interpretação do ficheiro com os dados faz-se via MATLAB®.



(a) PCB com o microcontrolador MK20DX256VLH7.



(b) Programação no microcontrolador MK20DX256VLH7.

Figura 4.2: (a) Placa de Circuito Impresso (PCB), contendo o microcontrolador MK20DX256VLH7 (NXP-Freescale®); (b) Carregamento do código.

Outro sistema de aquisição de dados utilizado recorre à ferramenta LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) (Bishop, 2012; Bitter et al., 2007; Ponce-Cruz & Ramírez-Figueroa, 2009), possibilitando gerar um ficheiro de texto, contendo os dados experimentais, a partir de um Instrumento Virtual (VI) (figura 4.3).

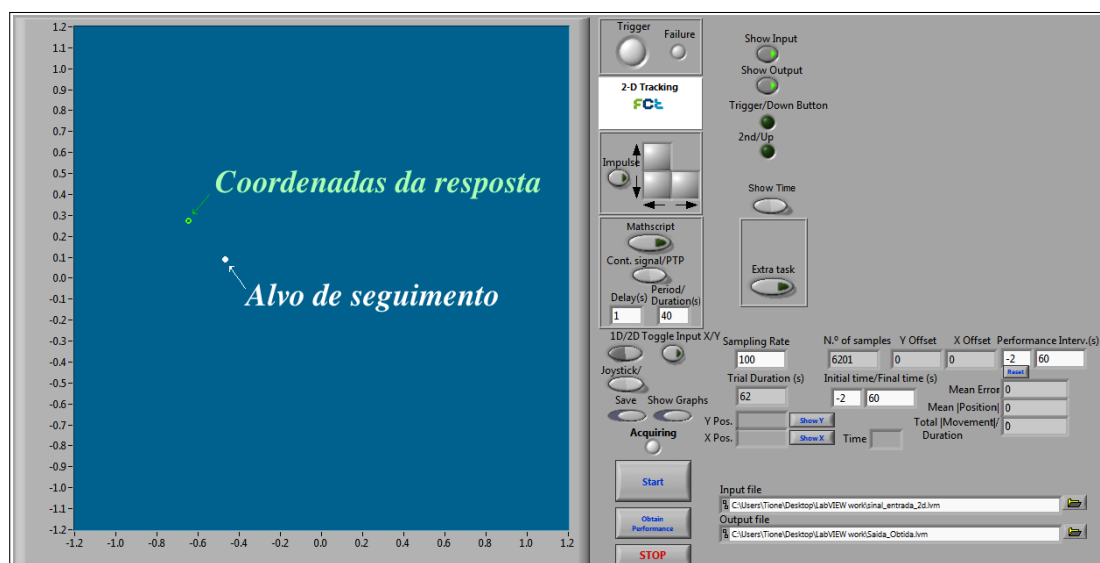


Figura 4.3: Instrumento Virtual desenvolvido para as experiências de seguimento.

Para a aquisição dos sinais associados às Interfaces Humano-Computador (HCIs) é ainda utilizada a ferramenta de programação Processing (Shiffman, 2009). A linguagem Processing foi inicialmente criada no Media Lab do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) e inclui um esquema de rascunhos focado para a programação flexível no contexto das artes visuais, tirando partido de diversas bibliotecas disponibilizadas, como a Biblioteca de *Software* Livre de Visão Computacional (OpenCV) (Dawson-Howe, 2014).

A Interface Gráfica do Utilizador (GUI) desenvolvida (figura 4.4) possibilita a criação automática de um ficheiro de texto, contendo os dados obtidos, para ser posteriormente interpretado através da ferramenta MATLAB®.

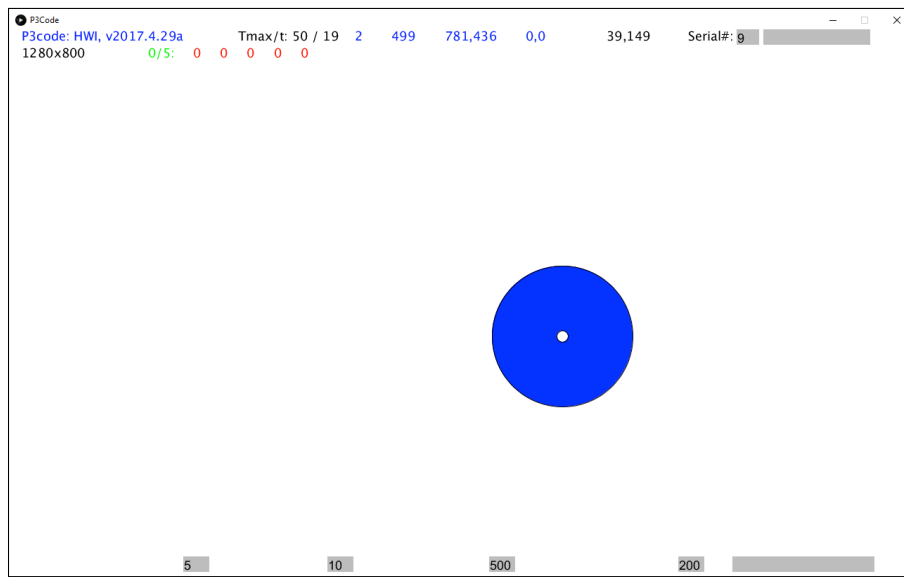


Figura 4.4: Aplicação desenvolvida em linguagem Processing 3, para a realização de experiências de seguimento Ponto-a-Ponto (PTP).

## 4.2 Classificação de frequências e aprendizagem supervisionada

No capítulo 3, (subsecção 3.2.1), descreve-se um modelo proposto, baseado na perceção humana de classificação de sinais em gamas de frequências, cujo diagrama conceptual é ilustrado na figura 4.5, resultante da criação de uma estrutura neuronal artificial com Linhas de Atraso (TDLs) e com duas camadas (figura 4.6), que permite distinguir sinais de seguimento de baixas e de altas frequências.

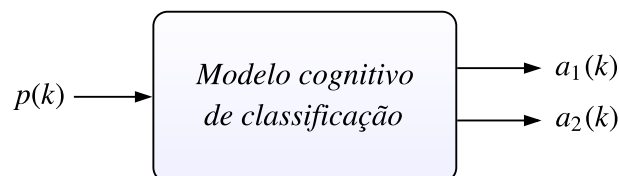


Figura 4.5: Diagrama conceptual do modelo de classificação de sinais em duas gamas de frequências.

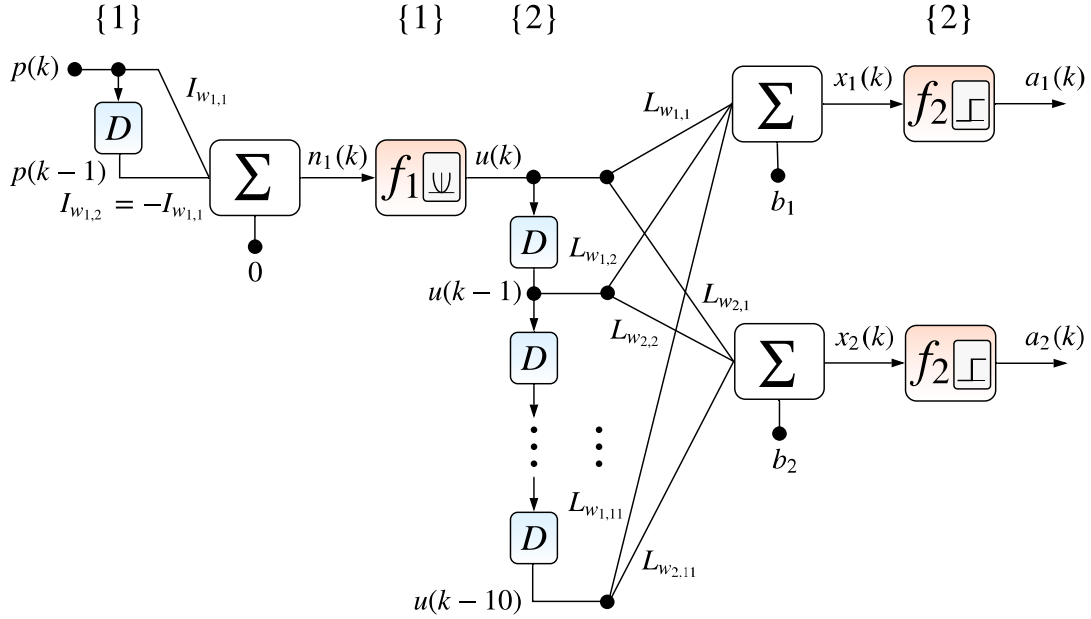


Figura 4.6: Modelo proposto de Rede Neuronal Artificial (ANN) de duas camadas ( $\{1\}$  e  $\{2\}$ ), para a classificação binária de sinais com duas diferentes frequências (Antunes & Coito, 2008).

Um exemplo de código MATLAB® para a implementação da estrutura da Rede Neuronal Artificial (ANN) proposta da figura 4.6, com dez atrasos D na segunda camada, é apresentado na listagem 4.1. A construção do sinal de entrada de teste, descrita na subsecção 4.2.1, recorre à ferramenta Simulink®.

Listagem 4.1: Código para a implementação em MATLAB® da estrutura da rede neuronal.

```
net=network,net.numInputs=1,net.numLayers=2;% cria a rede neuronal
                                     % (1 entrada, 2 camadas)
net.biasConnect=[0; 1],net.inputConnect=[1; 0]; % estrutura da rede
net.layerConnect=[0 0;1 0],net.layers{1}.size=1; % estrutura da rede
net.layers{1}.transferFcn='fquadratica';% função quadrática,
                                     % previamente definida
net.layers{2}.size=2; % estrutura da rede
net.layers{2}.transferFcn='hardlim'; % função hardlim
net.outputConnect=[1 1],net.targetConnect=[1 1]; % estrutura da rede
net.inputWeights{1,1}.delays=[0 1]; % estrutura da rede
net.layerWeights{2,1}.delays=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10]; % estrutura
                                     % da rede
net.IW{1,1}=[4 -4]; % Iw1,1=4    Iw1,2=-4    % estrutura da rede
net.LW{2,1}=[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ; -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 ...
    -1 -1]; % Lw1,1=Lw1,2=...=Lw1,11=1    Lw2,1=Lw2,2=...=Lw2,11=-1
net.b{1}=[]; % entrada de polaridade da 1ª camada: b=0
net.b{2}=[-4 ;1]; % entradas de polaridade da 2ª camada: b1=-4 b2=1
```

### 4.2.1 Entrada de teste da rede neuronal

O sinal de entrada utilizado, gerado a partir do Simulink® (geradores de sinal n.º 1 e n.º 2 da figura 4.7), consiste num sinal sinusoidal de 2 V de amplitude pico-a-pico e com duas frequências distintas, respetivamente 1 Hz e 4 Hz, consideradas a baixa e a alta frequência <sup>2</sup>. O período de amostragem  $T_s$  é 10 ms. Para evitar descontinuidades no sinal de teste  $p(k)$  (figura 4.8), implementou-se um Filtro Passa-Baixo (LPF) de segunda ordem  $H_{LP}(s)$ , definido por

$$H_{LP}(s) = \frac{1}{4 \times 10^{-4}s^2 + 0,0280s + 1} \quad (4.1)$$

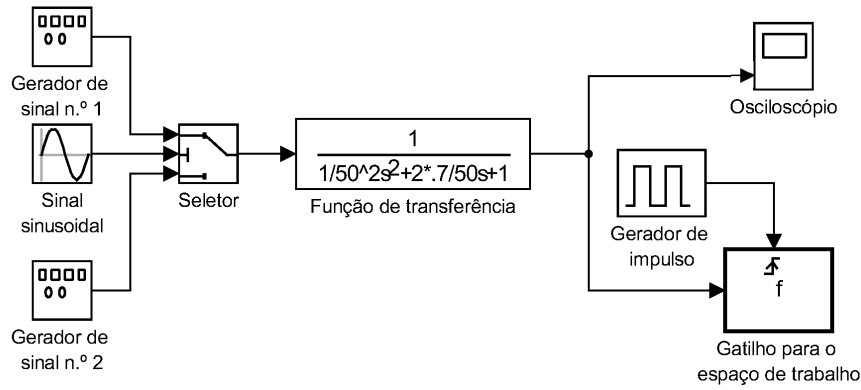


Figura 4.7: Diagrama de blocos (Simulink®) para a geração do sinal de entrada de teste da rede neuronal.

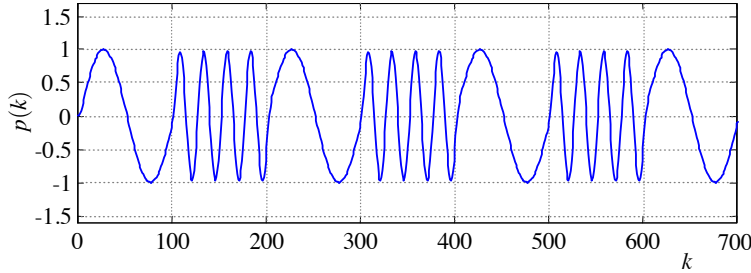


Figura 4.8: Sinal  $p(k)$  de entrada de teste, utilizado para a validação experimental da rede neuronal proposta.

### 4.2.2 Treino da rede neuronal

O treino da rede neuronal da figura 4.6 é efetuado recorrendo à aprendizagem supervisionada (Cunningham et al., 2008). Quando o valor do erro pretendido ou o número máximo de iterações é atingido, o algoritmo de treino pára, sendo automaticamente obtidos os parâmetros finais da rede. Caso contrário, será executada nova iteração. A técnica de treino recorre ao algoritmo de aprendizagem de Widrow-Hoff (algoritmo 3.1). Com todos os valores dos pesos e das entradas de polaridade das duas camadas inicialmente nulos, é calculado o erro quadrático médio  $M_{SE}$  para o

<sup>2</sup> A gama de baixas e de altas frequências do operador humano é escolhida, neste caso entre 1,0 Hz e 4,0 Hz, com uma separação mínima de 2,5 Hz, sendo treinada a rede para a classificação do sinal  $p(k)$ .

alvo  $a_1(k)$  e  $a_2(k)$  de saída pretendido (figura 4.13), que corresponde, neste caso, a duas saídas binárias, tomando os valores “0” e “1”, “0” e “0”, ou “1” e “0” em cada uma das gamas de frequências do sinal de entrada de teste  $p(k)$  considerado. Apresenta-se na listagem 4.2 o código MATLAB® para o treino da rede proposta, com a taxa de aprendizagem  $l_r = 0,1$ .

Listagem 4.2: Código MATLAB® para o treino da rede neuronal.

```
% condições iniciais nulas da rede previamente definida
net.IW{1,1}=0;
net.LW{2,1}=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ; 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
net.b{2}=[0; 0];
% parâmetros de treino
net.trainFcn='trainb';
% treino batch
net.performFcn='mse'; % erro quadrático médio
net.inputWeights{1,1}.learnFcn='learnwh'; % algoritmo de Widrow-Hoff
net.layerWeights{2,1}.learnFcn='learnwh'; % algoritmo de Widrow-Hoff
net.biases{2}.learnFcn='learnwh'; % algoritmo de Widrow-Hoff
net.inputWeights{1,1}.learnParam=struct('lr',0.1); % taxa aprendizagem
net.layerWeights{2,1}.learnParam=struct('lr',0.1); % taxa aprendizagem
net.biases{2}.learnParam=struct('lr',0.1); % taxa aprendizagem
net.trainParam.epochs=100; % número máximo de iterações
net.trainParam.show=5; % iterações entre a visualização
net.trainParam.goal=0.0001; % objetivo
% treino
T1=A; % vetor de alvos da rede, a definir previamente
net=train(net,P1,T1); % treino da rede, com o vetor de entrada P1 a
                        % definir previamente
```

Os pesos e as entradas de polaridade foram obtidos após o treino da rede neuronal, tendo em conta uma dada taxa de aprendizagem  $l_r$ , compreendida entre 0,5 e 0,05, tendo como objetivo um erro quadrático médio  $M_{SE}$  de  $0,0001 = 1 \times 10^{-4}$ .

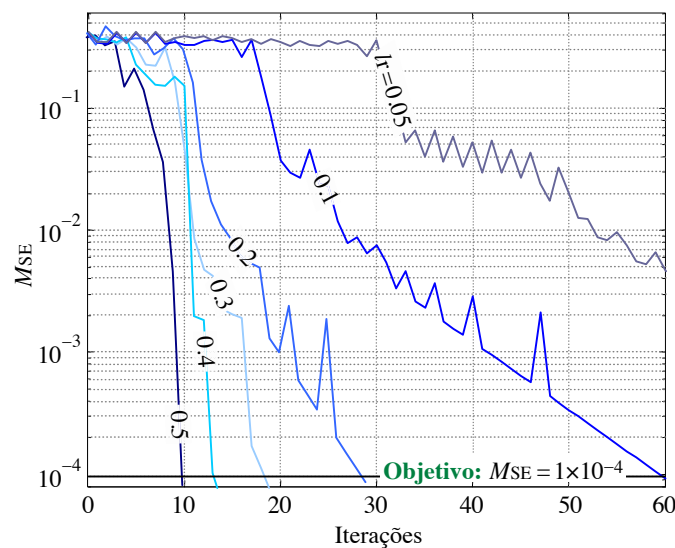


Figura 4.9: Resultados do treino da Rede Neuronal Artificial proposta, para diferentes taxas de aprendizagem  $l_r$ .

Com os valores da taxa de aprendizagem aplicados, verifica-se na figura 4.9 a convergência para o objetivo predefinido. No entanto, quando a taxa de aprendizagem  $l_r$  toma valores mais pequenos, é possível observar a ocorrência de um maior número de mínimos locais durante a convergência para o alvo, sendo que o número de iterações necessárias para o atingir será também maior. Se a taxa de aprendizagem  $l_r$  for aproximadamente superior a 0,52 o algoritmo de treino deixará de convergir para o objetivo, levando nesta situação a uma aprendizagem instável.

A função MATLAB® *trainb()* treina a rede neuronal de acordo com as regras de aprendizagem dos pesos e das entradas de polaridade, com atualizações em série, sendo que os pesos e as entradas de polaridade no final de uma iteração serão atualizados através dos dados de entrada. Da figura 4.9 pode-se constatar que com  $l_r = 0,1$  o alvo é atingido ao fim de aproximadamente 60 iterações, terminando a aprendizagem da rede neuronal com

$$\begin{aligned} \text{net.IW}\{1\} &= \begin{bmatrix} -3,99 & 3,96 \end{bmatrix} \Rightarrow I_{w_{1,1}} = -3,99, I_{w_{1,2}} = 3,96 \\ \text{net.b}\{1\} &= \begin{bmatrix} \end{bmatrix} \Rightarrow b = 0 \\ \text{net.LW}\{2\} &= \\ &\begin{bmatrix} 36,22 & 35,78 & 34,25 & 32,39 & 30,49 & 29,03 & 28,48 & 29,12 & 30,97 & 33,72 & 36,80 \\ -50,56 & -45,59 & -40,59 & -37,05 & -35,08 & -33,82 & -32,65 & -31,62 & -31,13 & -31,68 & -33,54 \end{bmatrix} \\ &\Rightarrow \mathbf{W}_{L_2, L_1} = \text{net.LW}\{2\} \\ \text{net.b}\{2\} &\begin{bmatrix} -135,40 & 45,30 \end{bmatrix}^T \Rightarrow b_1 = -135,40, b_2 = 45,30 \end{aligned}$$

sendo nulo o valor da entrada de polaridade para a primeira camada da rede.

Na figura 4.10 são apresentados os valores dos pesos  $L_{w1,i}$  e  $L_{w2,i}$  em função da entrada de atraso  $i$ , para as taxas de aprendizagem predefinidas  $l_r$ .

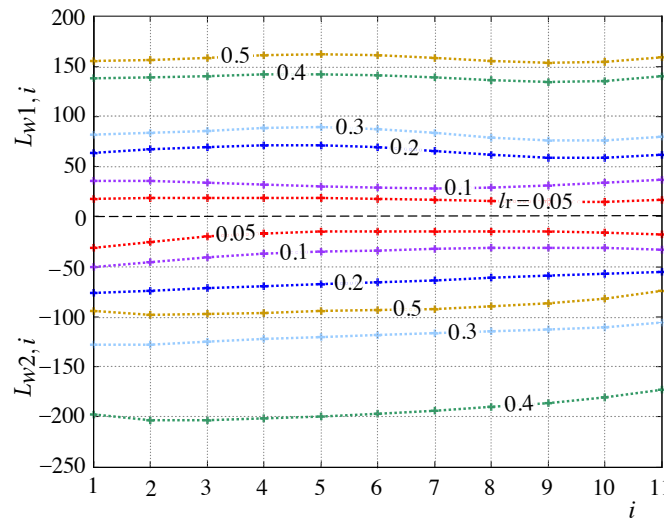


Figura 4.10: Pesos da 2ª camada da rede neuronal proposta, para diferentes taxas de aprendizagem  $l_r$ .

Os pesos  $L_{w1,i}$  e  $L_{w2,i}$  possuem sempre diferente sinal (3.24). Verifica-se também que os valores dos pesos associados a um mesmo neurónio de saída apresentam pequenas variações após o treino da rede. Estes resultados revelam que a estrutura neuronal de saída tende a comportar-se

de forma aproximada a um integrador discreto. Na tabela 4.1 são apresentados os pesos associados à 1ª camada da rede neuronal após o treino, para cada uma das taxas de aprendizagem utilizadas.

Tabela 4.1: Pesos da primeira camada *versus* taxa de aprendizagem.

	Taxa de aprendizagem $l_r$					
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$I_{w1,1}$	-3,993	-3,993	-3,994	-3,995	-3,996	-3,994
$I_{w1,2}$	3,959	3,960	3,961	3,965	3,970	3,961

Como os valores de  $I_{w1,1}$  e  $I_{w1,2}$  apresentam simetria para as diversas taxas de aprendizagem  $l_r$ , confirma-se que a estrutura neuronal da camada de entrada começa, inicialmente, por executar uma operação discreta de derivação ao sinal de entrada  $p(k)$ . Na tabela 4.2 são apresentados os valores das entradas de polaridade  $b_1$  e  $b_2$ , correspondentes à segunda camada da rede neuronal proposta, obtidas após o treino para cada uma das taxas de aprendizagem utilizadas.

Tabela 4.2: Entradas de polaridade da segunda camada *versus* taxa de aprendizagem.

	Taxa de aprendizagem $l_r$					
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$b_1$	-68,8	-135,4	-254,8	-325,5	-554,0	-622,0
$b_2$	24,0	45,3	82,2	155,1	232,0	115,5

Dos resultados expressos na tabela 4.2, pode-se verificar que as entradas de polaridade  $b_1$  e  $b_2$  da rede neuronal variam com a taxa de aprendizagem  $l_r$ , embora possuam sempre diferentes sinais e o valor absoluto da sua razão, para cada um dos valores de  $l_r$ , varie entre 2,1 e 5,4.

### 4.2.3 Resultados do sistema de classificação

Por forma a testar a estrutura neuronal proposta, ilustrada na figura 4.6, foi introduzido o sinal de entrada filtrado  $p(k)$ , cuja construção é descrita na subsecção 4.2.1. Os pesos e as entradas de polaridade da Rede Neuronal, inicialmente nulos, foram obtidos após o treino da rede com a taxa de aprendizagem  $l_r = 0,1$ , tendo sido atingido o objetivo  $M_{SE} = 0,0001 = 1 \times 10^{-4}$  ao fim de 60 iterações (figura 4.9). Foi utilizado o algoritmo MATLAB® de aprendizagem 'learnwh'. O treino conduzido em 2008 com um processador Intel® Pentium® IV e o Windows®XP demorou 10 min e 4 s, para  $l_r = 0,1$ . Nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13 são apresentadas as primeiras 701 amostras do sinal de entrada  $p(k)$ , e os sinais de saída  $u(k)$ ,  $x_1(k)$ ,  $x_2(k)$ ,  $a_1(k)$  e  $a_2(k)$ .

Tendo em conta os resultados obtidos da figura 4.13 (Antunes & Coito, 2008), pode confirmar-se que a rede neuronal classifica com sucesso os intervalos faseados de altas e de baixas frequências do sinal de entrada  $p(k)$ , exceto nas regiões de transição. De modo a poder efetuar um teste às funcionalidades da rede neuronal proposta, na região de frequências de operação do humano, são ainda utilizadas na entrada duas ondas de dente de serra faseadas no tempo (geradores de sinal n.º 1 e n.º 2 da figura 4.7), com diferentes amplitudes e frequências (respetivamente de 1 V pico-a-pico e 0,63 Hz, e de 3 V pico-a-pico e 8 Hz), para uma frequência de amostragem  $F_s$  de 100 Hz. Foi aplicado o filtro  $H_{LP}(s)$  de (4.1) à entrada, para a obtenção do sinal  $p(k)$  da figura 4.14.



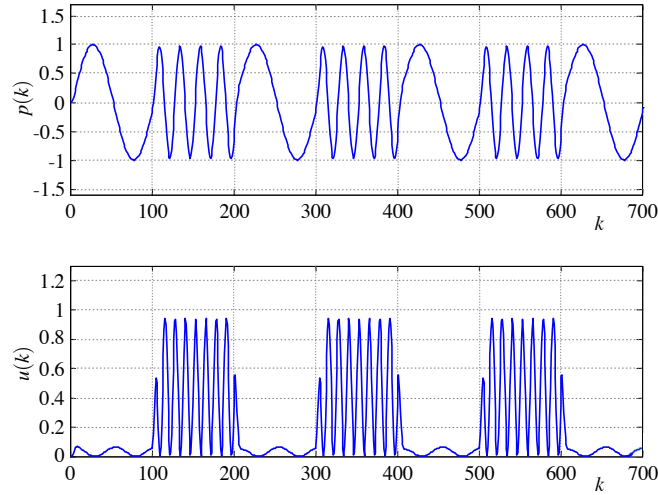


Figura 4.11: Sinal sinusoidal de entrada de teste  $p(k)$ , e sinal de saída  $u(k)$  da 1ª camada da rede neuronal.

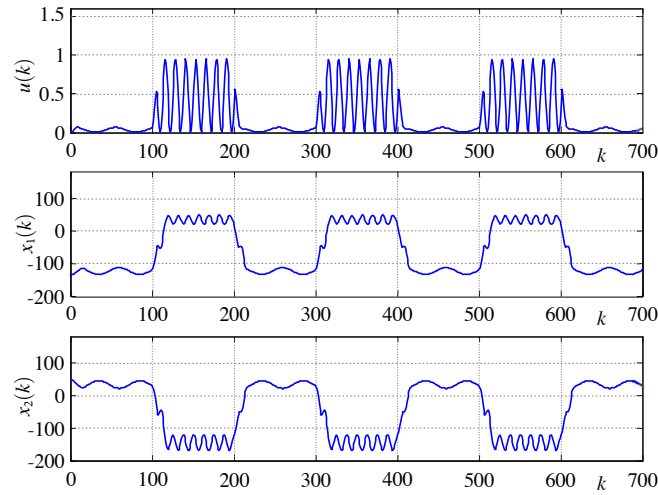


Figura 4.12: Sinal de saída  $u(k)$  da 1ª camada, e saídas  $x_1(k)$  e  $x_2(k)$  da 2ª camada da rede neuronal.

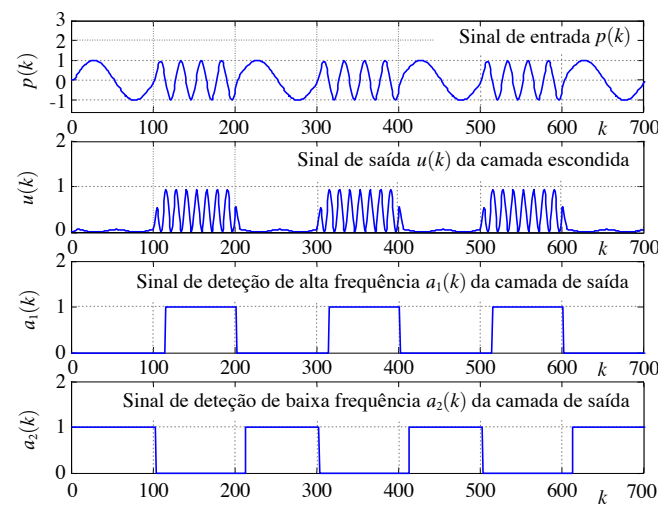


Figura 4.13: Saídas resultantes  $a_1(k)$  e  $a_2(k)$  da rede proposta, obtidas a partir do sinal de entrada  $p(k)$ .

O modelo de Rede Neuronal Artificial desenvolvido, permite distinguir os dois sinais de diferentes frequências. Uma vez que a estrutura da rede possui atrasos, esta poderá, ainda assim, dar origem a algumas imprecisões na classificação, especialmente em intervalos de tempo pequenos, onde se verifiquem elevadas variações de amplitude do sinal de entrada <sup>3</sup>.

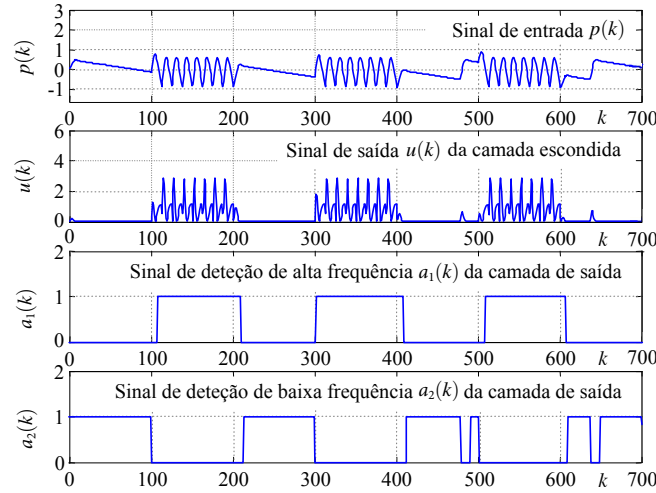


Figura 4.14: Saídas finais resultantes  $a_1(k)$  e  $a_2(k)$  da rede neuronal, obtidas a partir de um sinal de entrada  $p(k)$  de dente de serra.

Por outro lado, esta estrutura neuronal irá necessariamente requerer mais tempo para a classificação nas suas saídas. Este tempo de atraso pode ser observado na figura 4.14, em  $a_1(k)$  e  $a_2(k)$ , nos instantes temporais próximos de 1 s ( $k = 100$ ), 2 s ( $k = 200$ ), 3 s ( $k = 300$ ), etc.

Atendendo ao facto dos modelos do comportamento humano não constituírem necessariamente funções imutáveis, de apresentarem variabilidade face ao indivíduo e dependerem também do tipo de sinal de entrada que é utilizado no processo de modelagem, é introduzida uma técnica de classificação para a deteção de sinais de seguimento de diferentes frequências (capítulo 3, subsecções 3.2.1 e 3.3.1) e secção 4.2. Esta técnica utiliza redes neuronais com Linhas de Atraso (TDLs).

A utilização de uma heurística baseada no comportamento humano para a definição da estrutura neuronal confirmou ser um método possível de classificação, já que os pesos de ambas as camadas convergem para a solução esperada de perceção. O modelo de rede neuronal proposto para a classificação de gamas de frequências foi testado em simulação com sucesso, recorrendo-se às ferramentas Simulink® e MATLAB®.

### 4.3 Seguimento unidimensional

As tarefas de seguimento estão presentes em inúmeras operações que envolvem sistemas humano-máquina, como a navegação, a pilotagem e a condução de veículos. Nesta secção são apresentados os resultados experimentais obtidos para a validação das técnicas de projeto de controladores

<sup>3</sup> Observando a figura 4.14, por exemplo para o intervalo de valores de  $k$  compreendido entre 475 e 485, que corresponde à janela temporal de 4,75 s a 4,85 s.

em sistemas de interação humano-máquina atuando sobre o Espaço Unidimensional. As técnicas de projeto utilizadas permitem o dimensionamento de um controlador ou compensador introduzido no sistema resultante (figura 4.15), que integra o operador humano, por forma a melhorar o desempenho global.

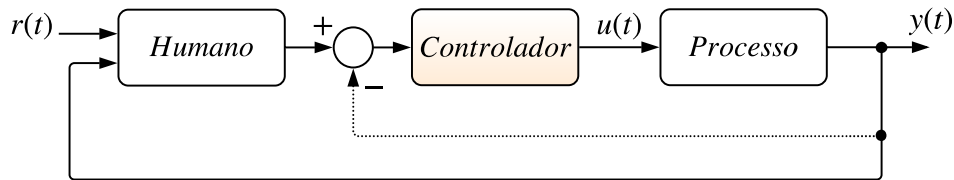
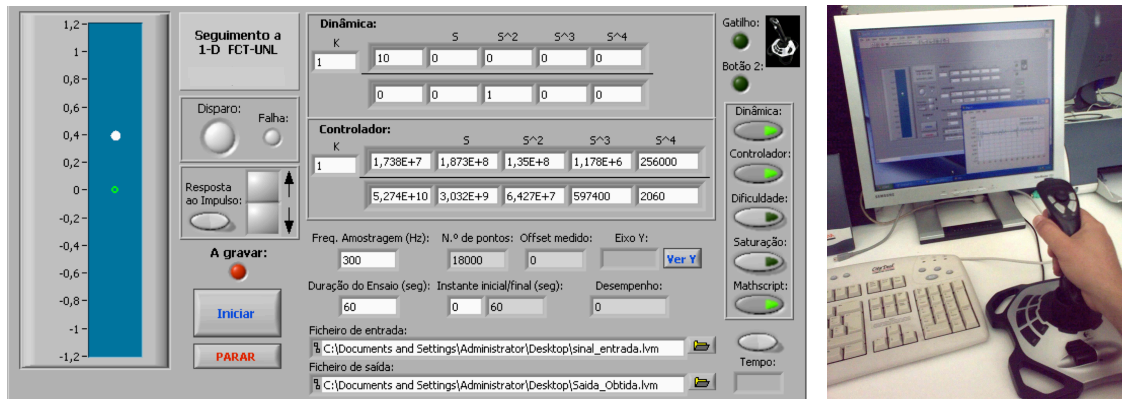


Figura 4.15: Diagrama de blocos proposto para o projeto de controlo humano-máquina no Espaço Unidimensional.

Para a implementação, o teste e a validação de controladores em tarefas manuais de seguimento no Espaço Unidimensional foi desenvolvida uma aplicação em ambiente LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*)<sup>4</sup> (figura 4.16.a), tendo sido adquirido o movimento vertical de um manípulo (figura 4.16.b).



(a) Aplicação desenvolvida em LabVIEW® para a realização de experiências de seguimento a 1D, e para a implementação do processo e do controlador. (b) Tarefa de seguimento.

Figura 4.16: Configuração experimental para as experiências de seguimento a 1D em perseguição, utilizando um manípulo (*joystick*).

### 4.3.1 Modelo ARX humano-máquina

Nesta subsecção são apresentados os procedimentos experimentais, tendo como objetivo, a estimação de um modelo ARX que permita caracterizar o sistema humano-máquina, assim como os resultados obtidos, tendo em conta as experiências de seguimento realizadas.

<sup>4</sup> O módulo integrado LabVIEW® MathScript RT® possibilita ainda o recurso a matemática textual no ambiente de desenvolvimento LabVIEW®, através de um compilador nativo para ficheiros MATLAB® ou GNU Octave®.

#### 4.3.1.1 Análise das respostas ao degrau e ao impulso

Para a análise transiente do sistema em consideração foram efetuados dois conjuntos de cinco experiências manuais de seguimento, cada uma com uma duração de dois minutos, com o sinal de entrada contendo um mínimo de seis degraus e de seis impulsos. As experiências foram realizadas com um manípulo, por um mesmo operador humano, sem historial de doenças neurológicas. Para assegurar que os fatores associados à memorização e à fadiga não influenciassem os resultados experimentais, foi ainda garantido um descanso mínimo entre cada experiência de, pelo menos, 15 minutos. Os sinais de entrada de degrau e de impulso são reconhecidos visualmente pelo operador humano através de indicadores do tipo LED (Díodo Emissor de Luz), colocados de forma visível na aplicação de teste (figura 4.16.a). A resposta ao degrau e ao impulso é realizada manualmente pelo operador, através do acionamento do manípulo, seguindo o mesmo comportamento do sinal de entrada. O manípulo utilizado (*joystick* de 8 *bits*, da figura 4.16.b) encontra-se fixo à bancada de teste.

Os resultados experimentais obtidos relativos às respostas ao degrau e ao impulso (Antunes et al., 2011) são apresentados nas figuras 4.17.a, 4.17.b e na tabela 4.3, revelando que o atraso puro não se encontra relacionado com o número de experiências realizadas, ou seja, com a experiência adquirida do operador.

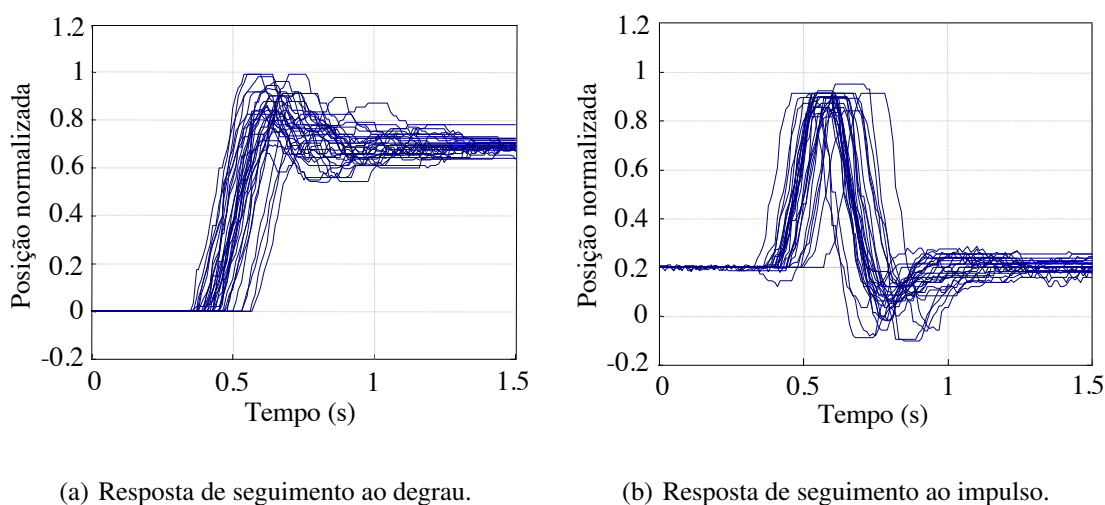


Figura 4.17: Respostas ao degrau e ao impulso do sistema humano-máquina, para uma frequência de amostragem de 100 Hz.

Dada a ocorrência de não linearidades e saturações nos limites e na proximidade da posição de origem da interface isométrica utilizada (figura 4.16.b), as experiências de resposta ao impulso foram realizadas com um deslocamento normalizado respetivo, de aproximadamente 20 % acima da posição de origem e de aproximadamente 20 % abaixo do limite máximo do manípulo, sendo este último também utilizado nas experiências de resposta ao degrau. O valor médio do atraso puro obtido para as experiências de resposta ao impulso e ao degrau foi de, respetivamente, 440 ms e 437 ms. Embora a análise de resposta transiente, descrita no capítulo 3 (subsecção 3.3.2), seja um método experimental não paramétrico de identificação simples, este método acarreta algumas

Tabela 4.3: Atraso puro (segundos) para cinco experiências manuais de seguimento ao degrau e ao impulso.

Impulso		Atraso (s)								
1–10	0,43	0,37	0,36	0,39	0,41	0,46	0,39	0,42	0,38	0,51
11–20	0,57	0,43	0,41	0,40	0,46	0,45	0,44	0,41	0,42	0,58
21–30	0,44	0,41	0,46	0,46	0,44	0,49	0,54	0,39	—	—
Degrau		Atraso (s)								
1–10	0,43	0,42	0,45	0,45	0,46	0,40	0,40	0,42	0,42	0,42
11–20	0,41	0,39	0,44	0,46	0,47	0,44	0,42	0,37	0,43	0,51
21–30	0,34	0,52	0,50	0,43	0,40	0,58	0,39	0,45	0,49	0,41

desvantagens, devidas essencialmente à existência de saturação aumentada, de não linearidades e ainda à eventual fadiga humana, causada com o decurso das experiências.

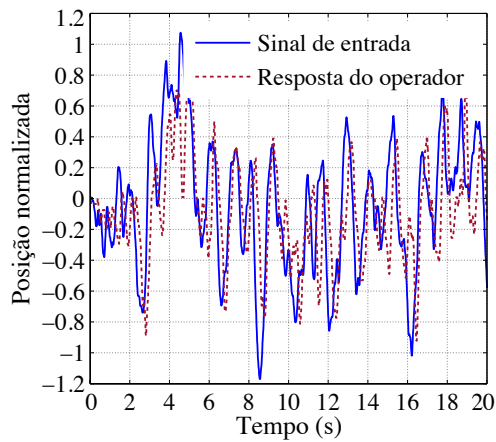
#### 4.3.1.2 Validação experimental do modelo ARX

A obtenção do modelo ARX do sistema humano-máquina, apresentado nas figuras 4.16 e 4.18.a, envolveu a realização de quatro experiências de seguimento, com uma duração de 120 segundos cada, com recurso a um sinal de entrada, filtrado por um Filtro Passa-Baixo  $H_{LP}(s)$  de segunda ordem, definido por

$$H_{LP}(s) = \frac{25}{s^2 + 7,071s + 25} \quad (4.2)$$



(a) Manípulo de oito bits Logitech Extreme 3D Pro.



(b) Sinal de seguimento e sinal do manípulo, de resposta do humano (primeiros 20 segundos).

Figura 4.18: (a) Manípulo (*joystick*) utilizado; (b) sinais de seguimento manual (primeiros 20 segundos).

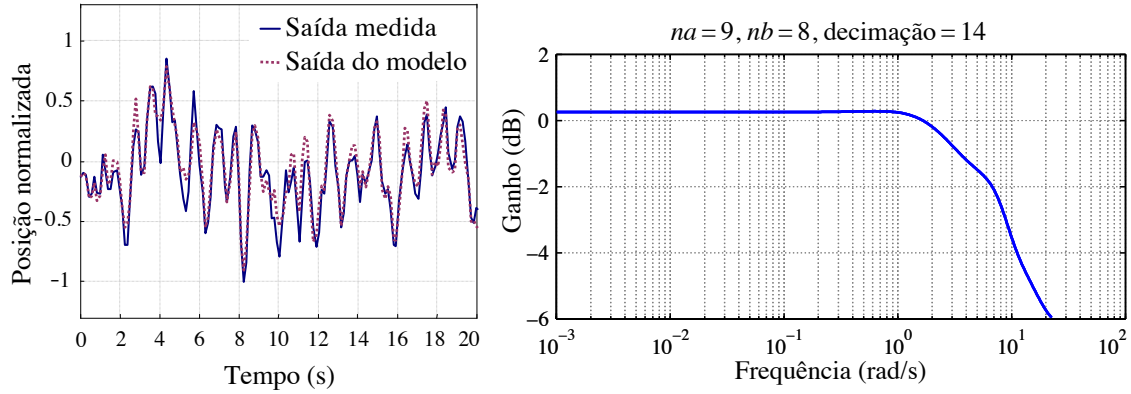
A função de transferência  $Q_{ARX}(s)$  do sistema humano-máquina (4.3) é obtida a partir dos dados experimentais, através do algoritmo 3.2, descrito no capítulo 3 (subsecção 3.3.3). Para a modelagem ARX humano-máquina, a melhor aproximação corresponde ao modelo obtido, dado por

$$Q_{ARX}(s) = e^{-0,28s} Q_{SA}(s) \quad (4.3)$$

com

$$Q_{SA}(s) = \frac{61,420s^7 - 1,580 \times 10^4 s^6 - 3,483 \times 10^5 s^5 - 1,785 \times 10^6 s^4}{s^9 + 116s^8 + 5730s^7 + 1,691 \times 10^5 s^6 + 3,198 \times 10^6 s^5 + 4,197 \times 10^7 s^4 + 3,243 \times 10^7 s^3 + 5,992 \times 10^8 s^2 + 3,584 \times 10^9 s + 4,209 \times 10^9 + 3,656 \times 10^8 s^3 + 2,132 \times 10^9 s^2 + 7,016 \times 10^9 s + 6,316 \times 10^9} \quad (4.4)$$

O atraso puro estimado do modelo ARX de (4.3) é de 280 ms. Verifica-se também que este valor é aproximadamente constante para o mesmo operador, sendo praticamente independente da experiência adquirida durante as tarefas de seguimento, pelo que o atraso puro pode ser separado para fins de identificação. Na figura 4.19 são apresentadas as características de  $Q_{SA}(s)$  (4.4).



(a) Saída medida *versus* saída do modelo (b) Diagrama de Bode de ganho para o modelo ARX-980. ARX-980 (primeiros 20 segundos).

Figura 4.19: Saídas obtidas (medida e do modelo) e diagrama de Bode de ganho do modelo humano-máquina sem atraso  $Q_{SA}(s)$ .

Os métodos de análise de resposta transiente para um sistema de interação humano-máquina, bem como os métodos de identificação de Modelos Auto-Regressivos com Entradas Exógenas (ARXs), tendo em conta os resultados experimentais obtidos para estas metodologias (figuras 4.17, 4.18.b, 4.19 e tabela 4.3), constituem técnicas de modelagem relativamente limitadas, que necessitam de validação adicional. O método melhorado de análise em frequência, descrito no capítulo 3 (subsecção 3.3.5), pode ser utilizado como uma alternativa viável para a obtenção de um modelo humano-máquina em anel aberto, Linear Invariante no Tempo, recorrendo à soma de um conjunto de sinais sinusoidais de entrada.

### 4.3.2 Modelo SISO e compensador humano-máquina

O procedimento experimental para a obtenção do modelo do sistema que inclui o operador e a interface manípulo (figura 4.18.a), consistiu na realização de 100 experiências de seguimento, cada uma com duração de 120 segundos, para um participante sem historial de problemas neurológicos. Foi assegurado um descanso mínimo de 10 minutos entre cada experiência, considerando a tarefa de seguimento.

O sinal de entrada de seguimento  $x(t)$  é formado por um conjunto de sinais de frequência

múltipla, de acordo com (3.43). Para cada frequência múltipla  $\omega_k$  (3.45) foi estabelecida uma certa amplitude de modo a ser possível a construção de um sinal de entrada não memorizável e seguível. A figura 4.20 ilustra o espectro de amplitude para o sinal unidimensional de entrada  $x(t)$ , utilizado nas experiências de seguimento.

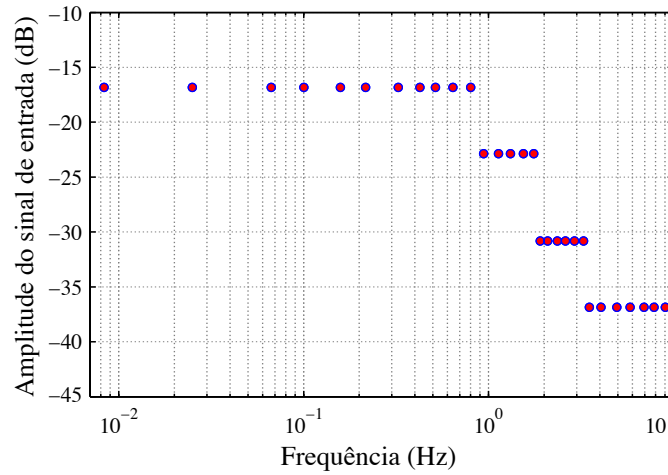


Figura 4.20: Espectro de amplitude de um sinal de seguimento, gerado pela soma de 30 frequências múltiplas ( $N_S = 30$ ) compreendidas entre 0,0083 Hz e 10 Hz.

Na figura 4.21 são apresentados os primeiros 20 segundos do sinal normalizado de entrada de seguimento e a respectiva resposta do operador.

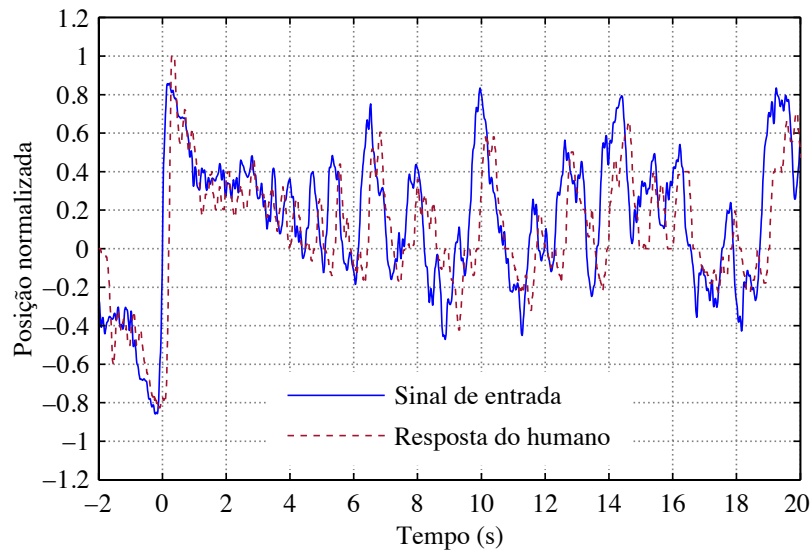


Figura 4.21: Sinais de seguimento unidimensional (primeiros 20 segundos), para uma frequência de amostragem de 100 Hz. O sinal de entrada de seguimento é nulo para os instantes  $t = 0$  s e  $t = 120$  s.



Através do método melhorado de análise em frequência e do procedimento de manipulação inversa, descritos no capítulo 3 (subsecção 3.3.5 e subsubsecção 3.3.5.1), foram obtidos 100 modelos humano-máquina lineares, em anel aberto, a partir dos dados das experiências de seguimento em anel fechado, para um mesmo indivíduo. Os limites  $2\sigma$  (figura 4.22) são também calculados. Assumindo uma distribuição normal unimodal, aproximadamente 95 dos modelos obtidos estarão dentro destes limites. O modelo Linear Invariante no Tempo de aproximação, proposto para o sistema humano-máquina  $Q(s) = H(s)M(s)$  é descrito em (4.5).

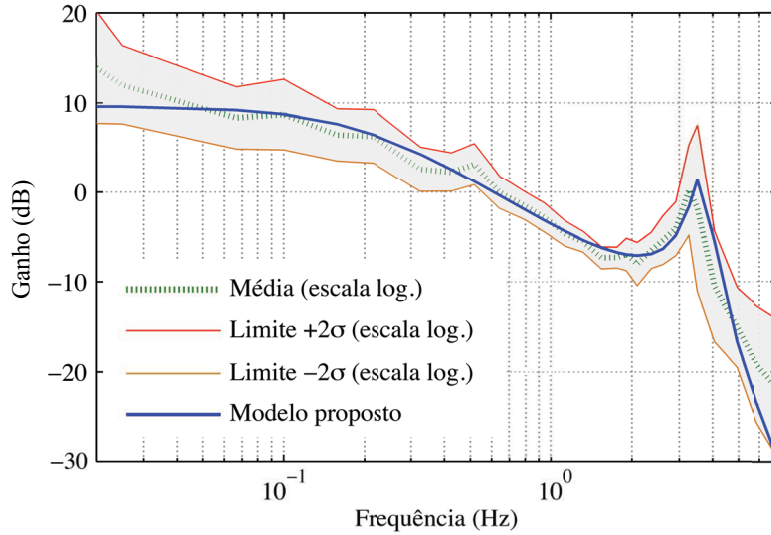


Figura 4.22: Diagrama de Bode de ganho dos modelos do sistema humano-máquina, obtidos a partir de 100 experiências de seguimento manual a 1D, para uma gama de frequências entre 0,02 Hz e 7 Hz.

$$Q(s) = H(s)M(s) = \frac{2060}{s^3 + 4,5s^2 + 527s + 679} \quad (4.5)$$

#### 4.3.2.1 Projeto do compensador SISO humano-máquina

São propostos três compensadores para controlar um processo com uma dinâmica  $P(s)$  instável<sup>5</sup>, constituída por um duplo integrador e um ganho, conforme

$$P(s) = \frac{10}{s^2} \quad (4.6)$$

A figura 4.23 ilustra o diagrama de blocos do sistema humano-máquina com Uma Entrada e Uma Saída (SISO), a controlar. O primeiro compensador proposto  $C_1$  é um compensador clássico de avanço de fase (3.61), descrito no capítulo 3 (subsecção 3.4.1), sendo definido por

$$C_1(s) = \frac{0,50s + 0,05}{s + 50} \quad (4.7)$$

<sup>5</sup> Desta forma aumentando consideravelmente o grau de dificuldade da tarefa, a realizar pelo operador humano.



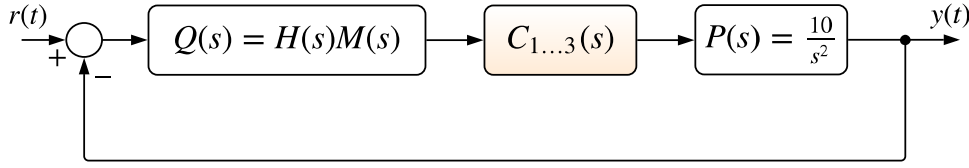


Figura 4.23: Diagrama de blocos simplificado para o sistema humano-máquina com compensação.

O segundo compensador  $C_2$  considera o modelo humano-máquina (4.5) apenas como um ganho estático ( $Q(s) = K_0 = 2060/679 = 3,034$ ), sendo

$$C_2(s) = \frac{C_1(s)}{K_0} = \frac{679}{2060} \frac{0,50s + 0,05}{s + 50} \quad (4.8)$$

O terceiro compensador proposto  $C_3$  (4.9) é obtido a partir do modelo proposto da Interface Humano-Máquina, onde  $Q_1(s)$  apresenta o mesmo comportamento em frequência de (4.5), mas inclui um termo adicional com três zeros para permitir a implementação física de  $C_3(s)$ , situados respetivamente em  $s = -83,397 \pm 5,222i$  e  $s = -72,929$ . Os compensadores e o processo foram implementados através da aplicação desenvolvida em LabVIEW® (figura 4.16.a).

$$C_3(s) = \frac{C_1(s)}{Q_1(s)} = \frac{256000s^4 + 1,178 \times 10^6 s^3 + 1,350 \times 10^8 s^2 + 1,873 \times 10^8 s + 1,738 \times 10^7}{2060s^4 + 597400s^3 + 6,427 \times 10^7 s^2 + 3,032 \times 10^9 s + 5,274 \times 10^{10}} \quad (4.9)$$

#### 4.3.2.2 Resultados de desempenho sem e com compensador SISO

Apresentam-se nas figuras 4.24 e 4.25 os resultados experimentais obtidos (Antunes et al., 2010b) da resposta ao degrau do sistema humano-máquina, na dinâmica instável  $P(s)$  (4.6) sem a utilização de compensador, e com a introdução dos compensadores  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ .

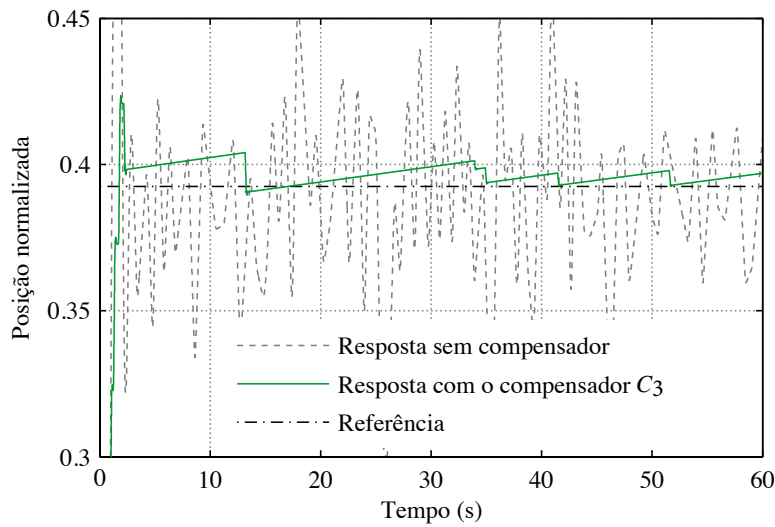


Figura 4.24: Resposta ao degrau para dois sistemas de controlo em anel fechado (sem compensador, e com o compensador  $C_3(s)$  desenvolvido), para uma dinâmica  $P(s)$  e uma frequência de amostragem de 300 Hz. A amplitude da referência é 0,393.

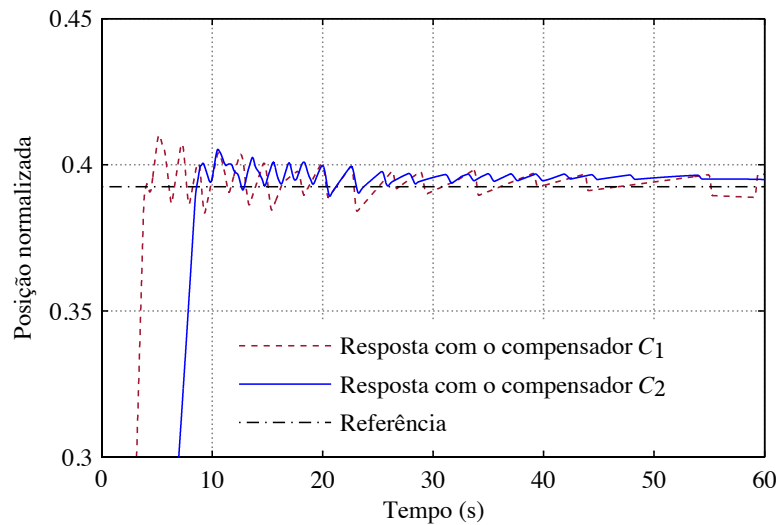


Figura 4.25: Resposta ao degrau para dois sistemas de controlo em anel fechado (com os compensadores  $C_1(s)$  e  $C_2(s)$ ), para uma dinâmica  $P(s)$  e uma amplitude da entrada de referência de 0,393. A frequência de amostragem é 300 Hz.

Das figuras 4.24 e 4.25, pode ser verificado que o compensador que conduziu à resposta ao degrau mais rápida foi o compensador  $C_3$ . A análise ao desempenho do sistema associado à resposta ao degrau no processo  $P(s)$  instável toma em consideração o erro quadrático médio  $M_{QE}$  definido em (3.102), capítulo 3 (subsecção 3.5.2), e o valor médio da duração estabilizada<sup>6</sup>, obtido para um intervalo de valores compreendido entre  $\pm 0,0035$  em torno da referência de entrada.

Tabela 4.4: Desempenho da resposta manual ao degrau do sistema humano-máquina (em 60 segundos) e margens de estabilidade, para o processo com dinâmica  $P(s)$ .

Desempenho	Compensador $C_1(s)$	Compensador $C_2(s)$	Compensador $C_3(s)$
Erro quadrático médio $M_{QE}$	0,0046	0,0092	0,0017
Duração estabilizada média (s)	1,5382	1,5542	5,5260
Número de sequências estabilizadas	24	20	5
Margens de estabilidade	Compensador $C_1(s)$	Compensador $C_2(s)$	Compensador $C_3(s)$
Frequência de cruzamento do ganho (Hz)	1,0618	1,0618	4,6104
Margem de ganho $G_M$ (dB)	40,5313	50,1712	52,1004
Frequência de cruzamento da fase (Hz)	0,0494	0,0202	0,0202
Margem de fase $\Phi_M$ (°)	58,2328	45,9675	51,4105

Os resultados de estabilidade apresentados na tabela 4.4, revelam que a introdução do compensador  $C_3$ , obtido a partir do modelo humano-máquina proposto e de  $C_1$  permite aumentar a largura de banda do sistema, melhorando, globalmente, as margens de estabilidade. Por sua vez, o compensador  $C_2$ , que assume o modelo humano-máquina como um simples ganho estático  $K_0$ , garante uma maior estabilidade do que o sistema com o compensador  $C_1$ , que não considera a existência no anel fechado do termo  $Q(s)$ . A introdução do mesmo comportamento em frequência deste termo no compensador  $C_3$ , através de  $Q_1(s)$ , permite assim a melhoria do desempenho do sistema humano-máquina.

<sup>6</sup> Medida associada às estratégias humanas de minimização do esforço.

Embora os modelos lineares e quase-lineares possam ser utilizados para captar as características mais relevantes de um sistema humano-máquina, sobretudo quando estejam em causa tarefas manuais simples, foi ainda verificado que os modelos humano-máquina são influenciados pelo sinal de entrada de seguimento utilizado. Desta constatação resulta que, a noção sistémica de dependência da tarefa deverá ser empregue para a modelagem do sistema humano-máquina e para o projeto de controlo de sistemas multi-modelo com o Humano Integrado no Anel (HuIL) de controlo. Em vez de compensadores humano-máquina de baixa ordem, podem também ser utilizados controladores mais complexos, obtidos com recurso a técnicas de controlo ótimo.

### 4.3.3 Modelo com base em sinais de seguimento, e controlador LQG HuIL

Nesta subsecção são apresentados e analisados os resultados experimentais para o projeto de controlo de sistemas humano-máquina com características dependentes das tarefas unidimensionais, através do método melhorado de análise em frequência, descrito no capítulo 3 (subsecção 3.3.5). Após a caracterização do operador humano e da interface, é realizado o projeto de controlo ótimo LQG, considerando a configuração experimental com o manipulador (figura 4.16) e o processo com dinâmica instável  $P(s)$  de (4.6).

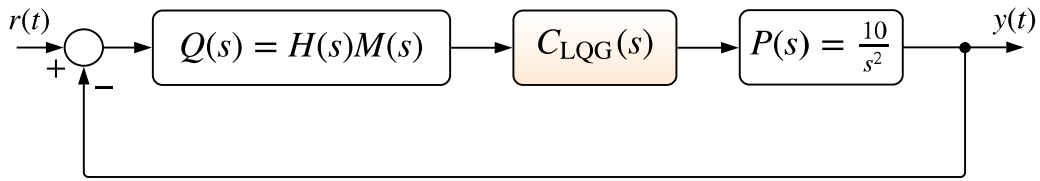


Figura 4.26: Diagrama de blocos do sistema de controlo humano-máquina em anel fechado.

#### 4.3.3.1 Sinal de entrada de múltiplas frequências

Tendo-se verificado experimentalmente que o espetro de frequências das experiências de seguimento manual encontra-se compreendido entre 0 Hz e 10 Hz, são propostos três sinais de entrada de seguimento  $r_{1,2,3}(t) = x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  de baixa, média e alta frequência (4.10), de duração temporal  $T = 120$  s (figura 4.27), constituídos por diferentes sinais de frequências múltiplas. A cada frequência múltipla de entrada  $\omega_k$  de (4.12), é associada uma determinada amplitude, para a criação de um sinal normalizado de seguimento em perseguição, manualmente exequível com um manipulador.

$$x_{1...3}(t) = x_0 + x_k(t) = x_0 + \sum_{k=1}^{N_s} a_{1...3_k} \sin(\omega_k t) \quad (4.10)$$

$$\max. \{|x_{1...3}(t)|\} = 1 \quad x_{1...3}(t = \{0, T\}) = x_0 \quad (4.11)$$

$$\omega_k = \frac{2k\pi}{T} \quad k \in \mathbb{N}^+ \quad (4.12)$$

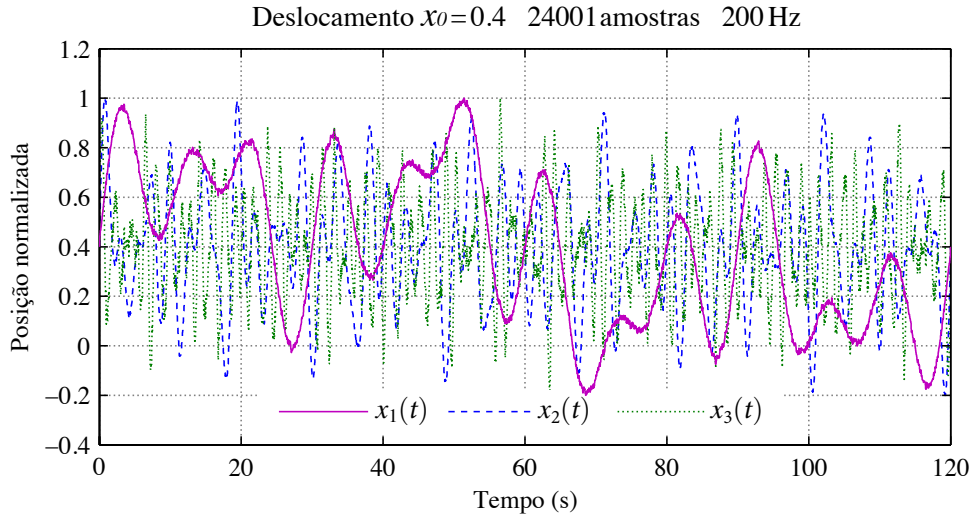


Figura 4.27: Sinais de seguimento  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  e  $x_3(t)$ , utilizados para a obtenção dos modelos do sistema humano-máquina.

A figura 4.28 apresenta o espectro de cada um dos três sinais de seguimento, obtido por Transformada Discreta de Fourier (DFT).

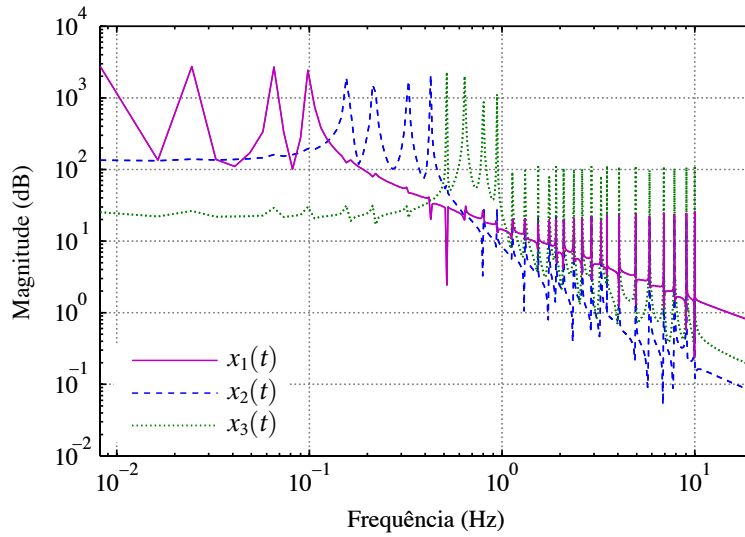


Figura 4.28: Espectro dos sinais da entrada de referência  $r_{1,2,3}(t) = x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$ .

Os sinais de entrada de referência  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  e  $x_3(t)$  possuem a mesma média (0,4). O ganho estático  $K_0$  (3.53) do sistema humano-máquina em anel fechado pode ser obtido a partir do valor médio  $\bar{y}$  da saída de seguimento correspondente. Como o deslocamento dos três sinais de entrada é conhecido ( $x_0 = 0,4$ ), de (3.53) virá

$$K_0 = \frac{y_0}{x_0} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} \quad (4.13)$$

#### 4.3.3.2 Multi-modelos humano-máquina

Experiências realizadas permitiram constatar que a resposta do operador humano depende diretamente da forma e do tipo do sinal de entrada. Verifica-se, por exemplo, que a resposta a um sinal de seguimento de elevada frequência irá diferir da resposta a um sinal de seguimento de baixa ou de média frequência<sup>7</sup>. Assim, para que seja possível obter um modelo humano-máquina suficientemente rico, será necessário captar a informação da resposta do operador, para diferentes bandas de frequência.

Para a obtenção dos modelos que caracterizam o sistema humano-máquina da figura 4.26, realizou-se o total de 180 experiências de seguimento manual, cada uma com duração  $T$  de 120 s, compreendendo alternadamente os três tipos de sinal de entrada. As experiências de seguimento foram realizadas em quatro sessões por um mesmo operador humano sem historial de problemas neurológicos, tendo sido assegurado um intervalo mínimo de cinco minutos de descanso entre as experiências. Os modelos em anel aberto foram obtidos através da técnica de identificação pelo método melhorado de análise em frequência e através do procedimento de manipulação inversa, descritos no capítulo 3 (subsecção 3.3.5 e subsubsecção 3.3.5.1), para cada um dos três conjuntos de dados (em anel fechado) adquiridos. Foram calculados os limites  $\pm 2\sigma$  (a vermelho, na figura 4.29.a), assumindo uma distribuição unimodal simétrica. O modelo nominal  $Q(s)$  proposto de aproximação humano-máquina em anel aberto (figura 4.29.b) é definido por

$$Q(s) = \frac{183683,894(s+0,858)^2}{(s+0,374)(s+0,140)(s+4,729)(s^2+1,671s+4,505)} \quad (4.14)$$

$$\frac{(s+4,457)^2(s+30,620)}{(s^2+4,708s+488,200)(s^2+21,460s+2568)}$$

#### 4.3.3.3 Projeto do controlador ótimo

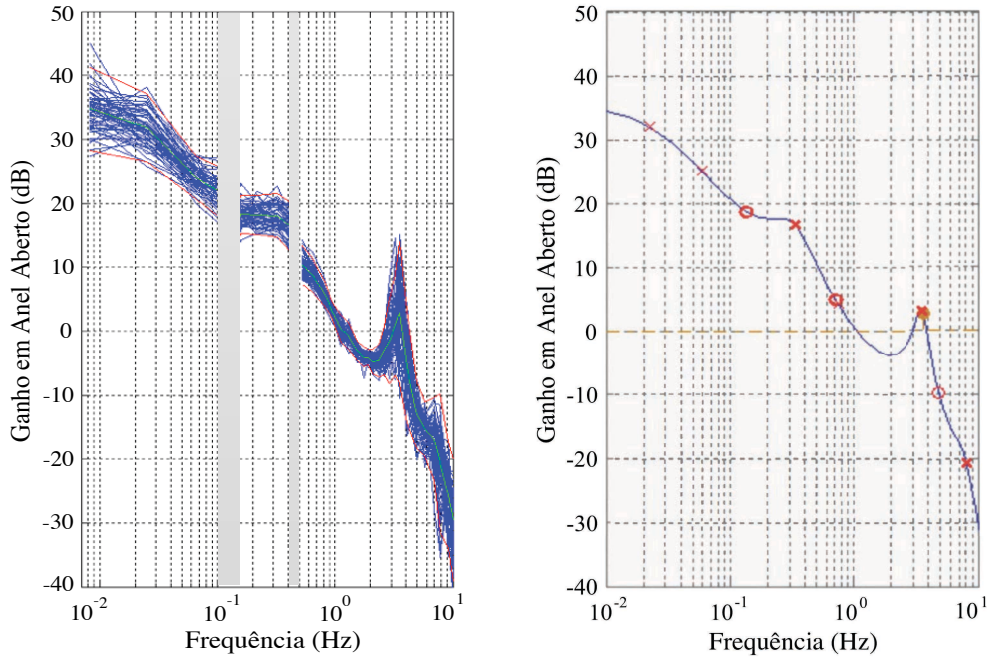
Para o projeto do controlador ótimo humano-máquina (figura 4.26), é proposta a técnica de controlo LQG, descrita no capítulo 3 (subsecção 3.4.3), que consiste na combinação de um regulador ótimo com um estimador ótimo. Esta técnica representa um compromisso entre desempenho e esforço de controlo, tomando ainda em conta o ruído da medida e as perturbações do processo. O controlador ótimo  $C_{LQG}(s)$  de (4.15) é diretamente obtido<sup>8</sup> do regulador ótimo Linear Quadrático Gaussiano, com  $\rho = 1 \times 10^{12}$ ,  $Q_n = 1 \times 10^{11}$ ,  $R_n = 0,1$  e  $N_n = 0$ , assumindo o método de discretização por Retentor de Amostras de Ordem Zero (ZOH) para a sua implementação, através da aplicação desenvolvida em LabVIEW®.

$$C_{LQG}(s) = \frac{-3,410 \times 10^4 s^{10} - 1,129 \times 10^6 s^9 - 1,144 \times 10^8 s^8 - 1,531 \times 10^9 s^7 - 4,983 \times 10^{10} s^6 - 3,117 \times 10^{11} s^5}{s^{11} + 449,800 s^{10} + 1,040 \times 10^5 s^9 + 1,557 \times 10^7 s^8 + 1,605 \times 10^9 s^7 + 1,123 \times 10^{11} s^6 + 4,850 \times 10^{12} s^5} \quad (4.15)$$

$$\frac{-7,017 \times 10^{11} s^4 - 1,219 \times 10^{12} s^3 - 5,176 \times 10^{11} s^2 - 5,623 \times 10^{10} s - 8,226 \times 10^8}{+9,992 \times 10^{13} s^4 + 7,378 \times 10^{14} s^3 + 2,176 \times 10^{15} s^2 + 2,343 \times 10^{15} s + 8,231 \times 10^{14}}$$

<sup>7</sup> O modelo de classificação, descrito na secção 4.2 e no capítulo 3 (subsecções 3.2.1 e 3.3.1), poderá servir para permitir a deteção do tipo de sinal de seguimento.

<sup>8</sup> A redução da ordem de uma função de transferência, nomeadamente através do cancelamento de pares de polos e zeros, poderá ser efetuada com recurso à função MATLAB® *minreal()*.



(a) Diagramas de Bode de ganho dos modelos humano-máquina de anel aberto, obtidos a partir dos 3 conjuntos de 60 diagramas de Bode de ganho dos modelos em anel fechado, para as baixas, médias e altas frequências (concatenação dos 3 conjuntos de diagramas).

(b) Diagrama de Bode de ganho do modelo humano-máquina nominal  $Q(s) = H(s)M(s)$  proposto, obtido a partir dos 3 conjuntos de 60 diagramas de Bode de ganho dos modelos em anel aberto, para frequências compreendidas entre 0,01 Hz e 10 Hz.

Figura 4.29: Obtenção do modelo nominal  $Q(s)$ , em anel aberto, do sistema humano-máquina, a partir das 180 respostas em frequência.

#### 4.3.3.4 Resultados de desempenho sem e com controlador LQG

Para a validação experimental do sistema de controlo ótimo baseado em multi-modelos HuIL, são consideradas três medidas para a quantificação do desempenho (figura 3.24), descritas no capítulo 3 (subsecção 3.5.2). Para a medida da exatidão é proposto em (3.102) o erro absoluto médio  $M_{QE}$  entre o sinal de entrada de seguimento e o sinal de resposta, e para a medida do esforço do operador são propostas respetivamente em (3.105) e (3.107) a deformação absoluta média  $M_{QD}$  e o valor total do movimento absoluto dividido pela duração da experiência  $T_{MD}$ .

Foi realizada uma experiência manual de seguimento unidimensional de 180 segundos de duração, num processo  $P(s)$  com dinâmica instável (4.6), que consiste em seguir com o manípulo (figura 4.18.a) um novo sinal contínuo normalizado, que possui diferentes frequências para cada um dos três intervalos de tempo considerados: [0 s, 60 s]; [60 s, 120 s]; [120 s, 180 s]. Os resultados (Antunes et al., 2010a) são apresentados nas figuras 4.30 a 4.35, mostrando a evolução temporal dos sinais de seguimento e de resposta do operador, do valor absoluto da posição do manípulo e do valor absoluto do movimento, resultantes da tarefa realizada sem a inclusão e com a inclusão do controlador ótimo  $C_{LQG}(s)$ . Este controlador é sintetizado a partir do modelo obtido, cuja identificação recorre à utilização de sinais de seguimento com diferentes frequências.

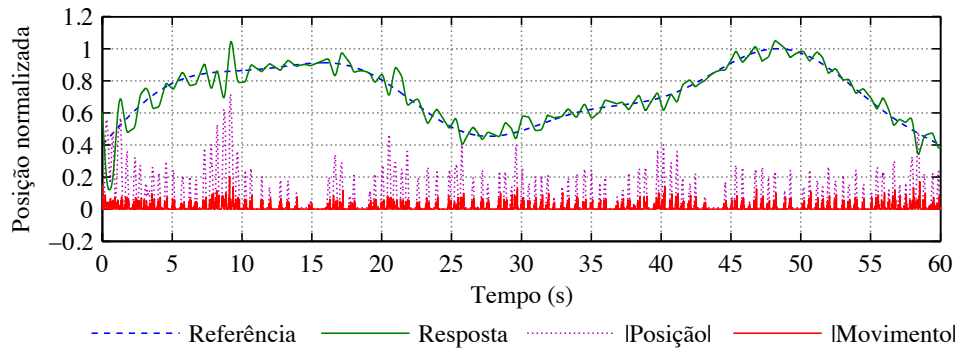


Figura 4.30: Seguimento manual (primeiro minuto) em  $P(s)$ , para  $x_1(t)$ , sem controlador.

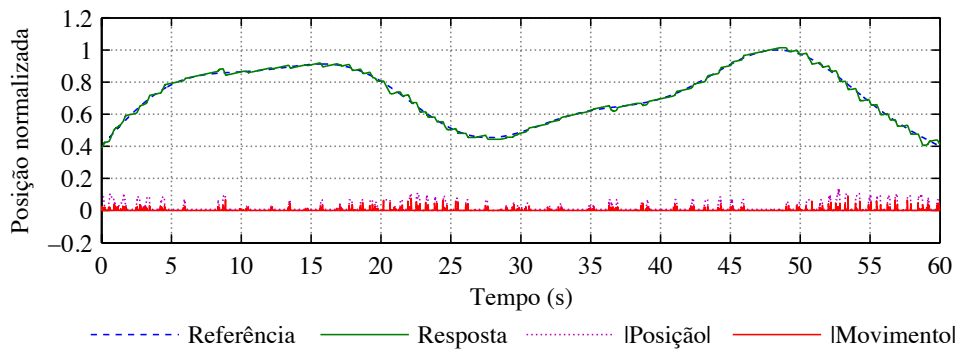


Figura 4.31: Seguimento manual (primeiro minuto) em  $P(s)$ , para  $x_1(t)$ , com o controlador ótimo  $C_{LQG}(s)$ .

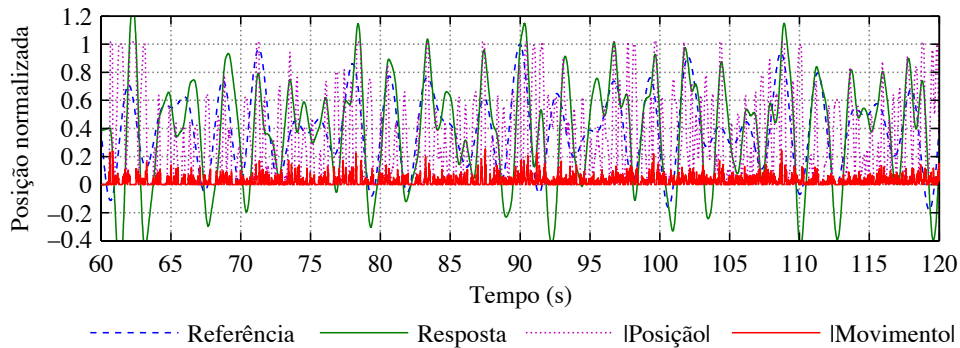


Figura 4.32: Seguimento manual (segundo minuto) em  $P(s)$ , para  $x_2(t)$ , sem controlador.

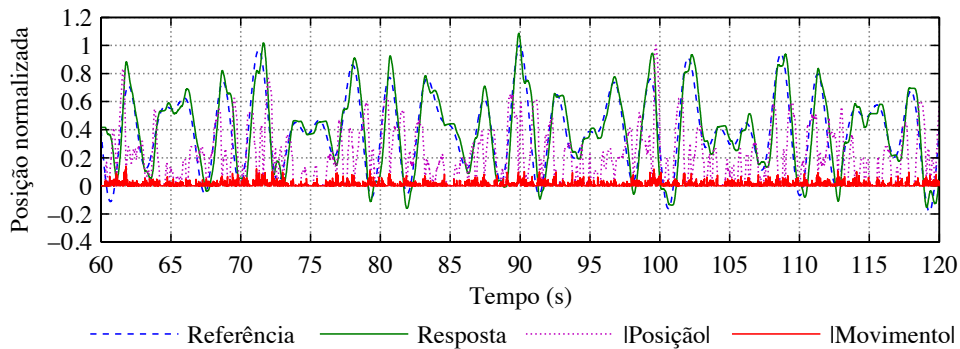


Figura 4.33: Seguimento manual (segundo minuto) em  $P(s)$ , para  $x_2(t)$ , com o controlador ótimo  $C_{LQG}(s)$ .



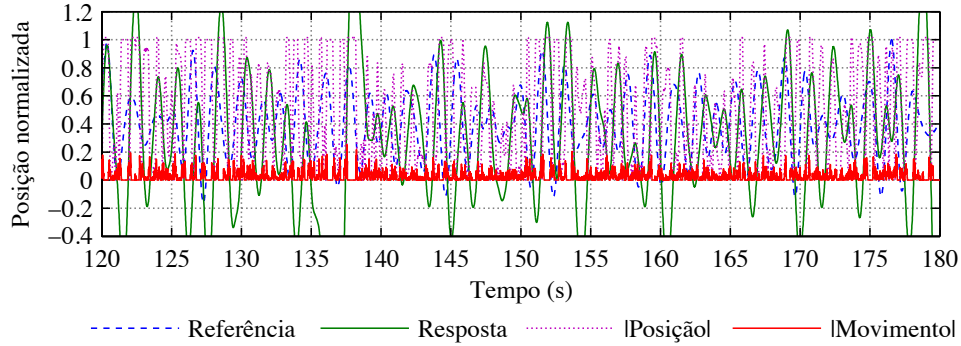


Figura 4.34: Seguimento manual (terceiro minuto) em  $P(s)$ , para  $x_3(t)$ , sem controlador.

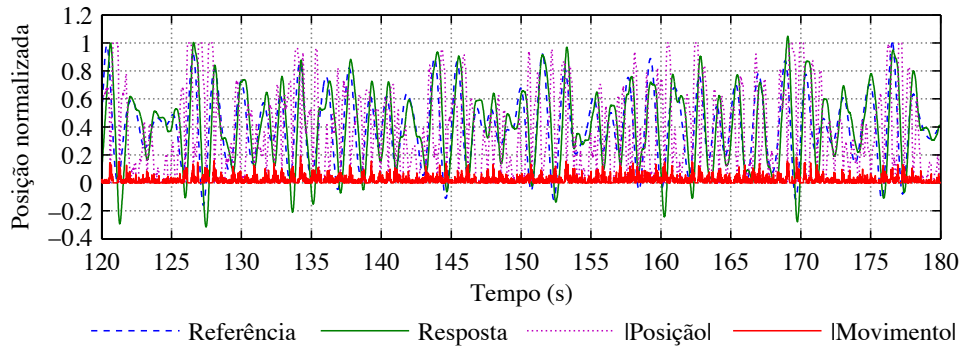


Figura 4.35: Seguimento manual (terceiro minuto) em  $P(s)$ , para  $x_3(t)$ , com o controlador ótimo  $C_{LQG}(s)$ .

A frequência de amostragem  $F_s$  utilizada é 100 Hz. Na tabela 4.5 são apresentados os valores de desempenho obtidos, relativos ao erro absoluto médio  $M_{QE}$ , à deformação absoluta média  $M_{QD}$  e à celeridade  $T_{MD}$ , definidas respetivamente no capítulo 3 (subsubsecções 3.5.2.1, 3.5.2.2 e 3.5.2.3).

Tabela 4.5: Medidas de exatidão e de esforço sem controlador e com o controlador  $C_{LQG}(s)$ , para uma experiência de seguimento unidimensional no processo  $P(s)$ .

Sem controlador			Com controlador $C_{LQG}(s)$		
$M_{QE}$	$M_{QD}$	$T_{MD} (s^{-1})$	$M_{QE}$	$M_{QD}$	$T_{MD} (s^{-1})$
0,236	0,304	1,997	0,076	0,209	1,108

A figura 4.36 mostra a evolução do erro absoluto médio, sem controlador e com o controlador LQG, para uma janela temporal de um segundo. Pode-se verificar que sem o controlador  $C_{LQG}(s)$  projetado, o operador humano levará mais tempo e esforço a melhorar a sua perícia nas tarefas de seguimento com o manípulo e com a dinâmica  $P(s)$  (4.6). Da análise dos dados obtidos, verifica-se que o desempenho do operador melhora significativamente com o controlador  $C_{LQG}(s)$ , sendo os fatores de diminuição de  $M_{QE}$ ,  $M_{QD}$  e  $T_{MD}$ , respetivamente 3,11, 1,45 e 1,80. Convém referir que a síntese do controlador  $C_{LQG}(s)$  nem sempre assegurará, de forma automática, boas propriedades no que respeita à robustez face às incertezas nos modelos humano-máquina. Estas propriedades terão de ser confirmadas separadamente, utilizando técnicas de “*loop-shaping*”, obtendo, por exemplo, os limites de incerteza no modelo propostos em Chao & Athans (1999).



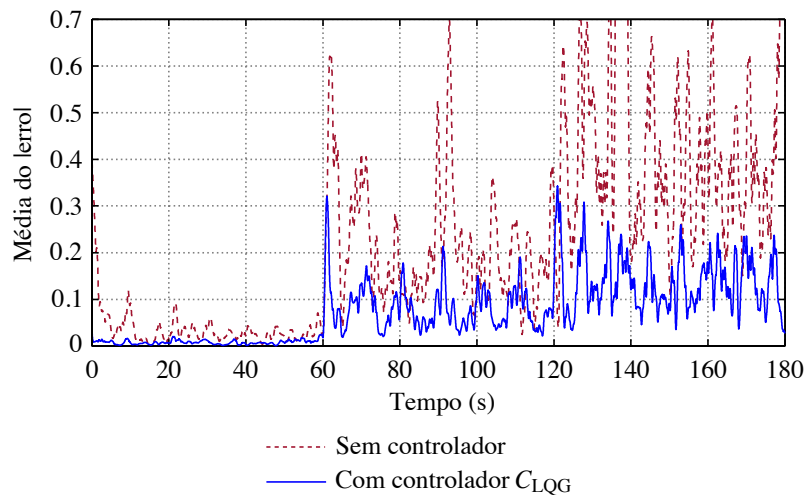


Figura 4.36: Evolução da média do erro absoluto, para uma janela temporal de um segundo.

É confirmada a existência de múltiplos modelos na identificação do comportamento do sistema humano-máquina. Devido às incertezas no modelo nominal humano-máquina Linear Invariante no Tempo, o projeto do controlador de assistência poderá ainda ser realizado recorrendo a técnicas de controlo robusto.

## 4.4 Seguimento multidimensional

A aplicação LabVIEW®, desenvolvida conforme a figura 4.3, permite a realização de tarefas de seguimento e de tarefas Ponto-a-Ponto no Espaço Bidimensional (2D) para um processo MIMO. Esta aplicação possibilita ainda a implementação prévia de um controlador e de um processo dinâmico.

### 4.4.1 Modelo MIMO e compensador humano-máquina

O movimento humano voluntário afeta o movimento da máquina porque o operador e a máquina formam um sistema em anel fechado. Assim, os modelos LTIs humano-máquina em anel aberto terão de ser extraídos a partir dos dados experimentais de anel fechado. O procedimento simplificado para obter o modelo MIMO humano-máquina envolveu a realização de 50 experiências de seguimento manual no Espaço Bidimensional com um manipulador, cada uma com uma duração  $T$  de 120 segundos. As experiências foram feitas alternadamente para cada eixo por um participante humano sem historial de doenças neurológicas. Foi ainda assegurado um descanso mínimo de cinco minutos entre as experiências. A entrada de seguimento consiste no sinal com o padrão da figura 4.21, agora com um deslocamento de  $x_0 = 0,4$ .

Recorrendo ao método melhorado de análise em frequência e ao procedimento de manipulação inversa, descritos no capítulo 3 (subsecção 3.3.5 e subsubsecção 3.3.5.1), foram obtidos os modelos nominais humano-máquina para cada eixo.

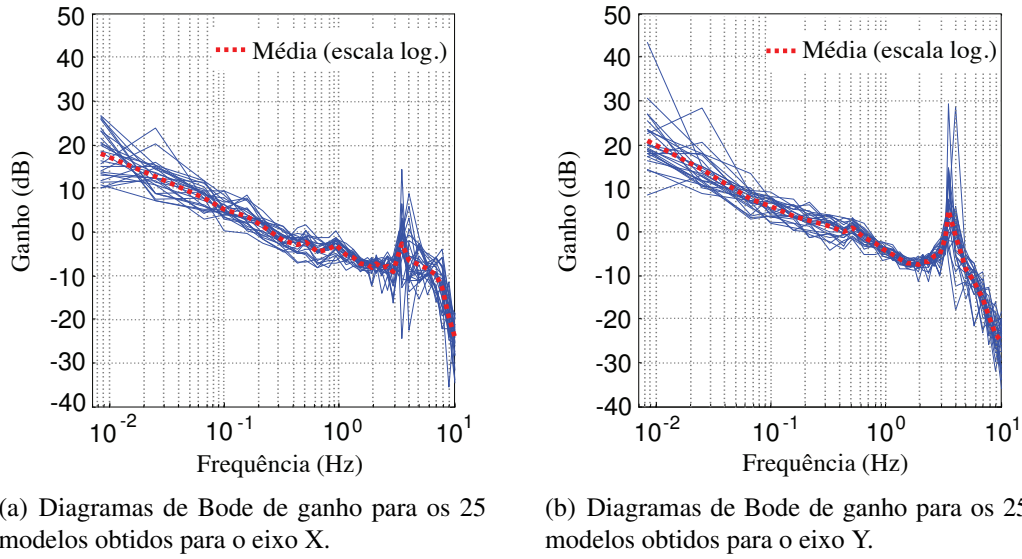


Figura 4.37: Diagramas de Bode de ganho dos modelos humano-máquina de anel aberto, obtidos para os eixos cartesianos X e Y.

Assume-se o comportamento humano-máquina em termos de ganho idêntico para ambos os eixos, sendo proposto, a partir dos resultados das figuras 4.37.a e 4.37.b, um único modelo estável ( $M_{xx}(s)$  e  $M_{yy}(s)$ ) com três polos, conforme (4.16). O procedimento experimental é realizado de forma independente para cada eixo. Nesta fase admite-se que o modelo de aproximação simplificado em espaço de estados não reflete o efeito de dependência cruzada entre os dois eixos considerados.

$$M_{xx}(s) \approx M_{yy}(s) = \frac{2060}{s^3 + 4,50s^2 + 527s + 679} \quad (4.16)$$

#### 4.4.1.1 Projeto do compensador MIMO humano-máquina

A Interface Humano-Máquina da figura 4.18.a é utilizada num processo MIMO instável  $P(s)$ , que consiste em dois duplos integradores, um para cada eixo, conforme

$$P_{xx}(s) = P_{yy}(s) = \frac{10}{s^2} \quad (4.17)$$

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_{xx}(s) & 0 \\ 0 & P_{yy}(s) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

A figura 4.38 apresenta o diagrama de blocos do sistema correspondente. São propostos dois tipos de compensadores, com o objetivo de controlar em ambos os eixos o processo instável. O primeiro compensador  $C_{AF}$  é um compensador de avanço de fase, descrito no capítulo 3 (subseção 3.4.1), sendo definido por

$$C_{AF}(s) = \frac{0,50s + 0,05}{s + 50} = 0,50 \left( \frac{s + 0,10}{s + 50} \right) \quad (4.19)$$

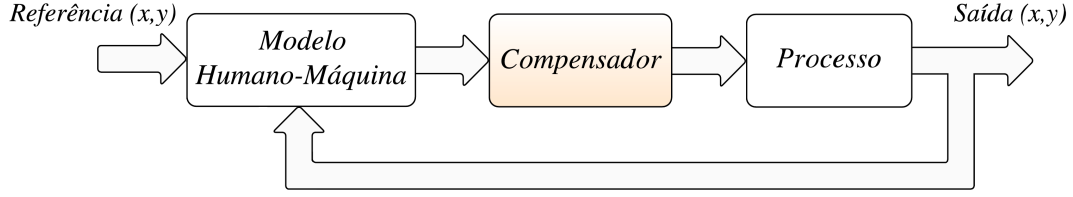


Figura 4.38: Diagrama de blocos conceitual do sistema humano-máquina multivariável, a ser controlado com um processo instável (ex: propulsando uma massa pelo espaço, na ausência de gravidade).

O segundo compensador  $C_H$ , proposto em (4.20 e 4.21), é obtido a partir de  $C_{AF}$  (4.19), tendo ainda em conta o modelo humano-máquina (4.16) para cada eixo,

$$C_{Hy}(s) = \frac{C_{AF}(s)}{F_1(s)} = \frac{256000s^4 + 1,178 \times 10^6 s^3 + 1,350 \times 10^8 s^2 + 1,873 \times 10^8 s + 1,738 \times 10^7}{2060s^4 + 597400s^3 + 6,427 \times 10^7 s^2 + 3,032 \times 10^9 s + 5,274 \times 10^{10}} \quad (4.20)$$

$$C_{Hxx}(s) = C_{Hy}(s) \quad (4.21)$$

em que a função de transferência  $F_1(s)$  apresenta o mesmo comportamento em frequência que (4.16), mas inclui agora um termo adicional <sup>9</sup>, para permitir a implementação de  $C_{Hxx}(s)$  e de  $C_{Hy}(s)$ . Uma representação em espaço de estados do sistema em anel fechado pode ser escrita genericamente na forma

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & [0] \\ [0] & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & [0] \\ [0] & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$y = \begin{bmatrix} C & [0] \\ [0] & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d & 0 \\ 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

sendo  $A$  a matriz de dinâmica,  $B$  a matriz de entrada,  $C$  a matriz de saída e  $d$  um escalar de transmissão direta que representa a ação direta da entrada na saída.

#### 4.4.1.2 Resultados de desempenho sem e com compensador MIMO

Para analisar o desempenho do operador humano com o compensador e o processo MIMO, foi realizada, através do Instrumento Virtual LabVIEW® da figura 4.3, uma experiência de seguimento bidimensional, com a duração de um minuto, com processo  $P(s)$  de dinâmica instável (4.6) para cada eixo, consistindo em seguir com o manípulo (figura 4.18.a) um alvo móvel elipsoidal, sem e com controladores. Os resultados obtidos (Antunes et al., 2012) são apresentados nas figuras 4.39 a 4.41, mostrando a evolução temporal dos sinais de seguimento, dos valores absolutos da referência, do erro de seguimento, da posição do manípulo e do movimento resultante.

<sup>9</sup> A divisão de  $C_{AF}(s)$  por  $M_{yy}(s)$  terá como resultado uma função de transferência imprópria, possuindo mais zeros do que polos, e como tal não realizável fisicamente. Daí a necessidade da inclusão do termo adicional, que possui ganho estático unitário e três polos não dominantes na frequência angular  $\omega$  de 12,732 Hz (80 rad s<sup>-1</sup>).

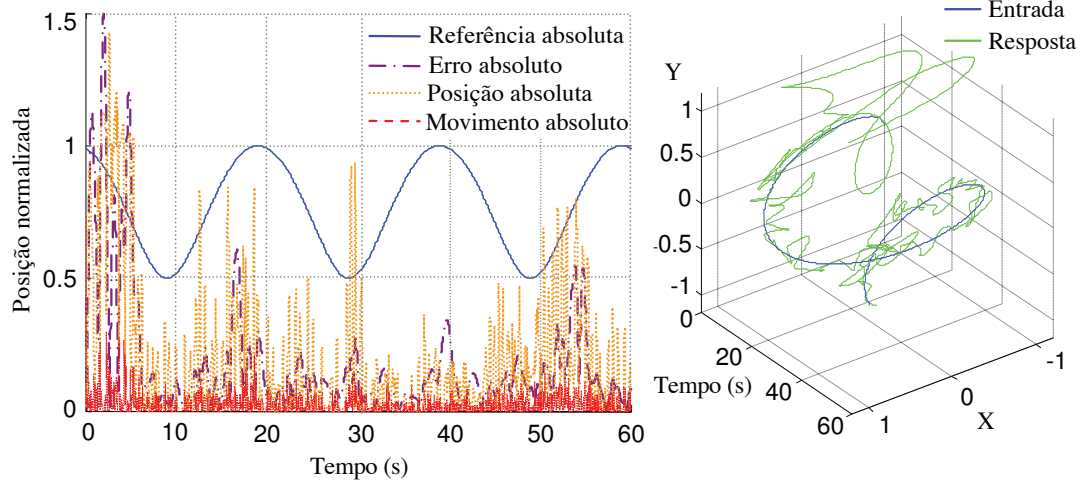


Figura 4.39: Seguimento com processo instável, para um alvo móvel elipsoidal, sem compensadores.

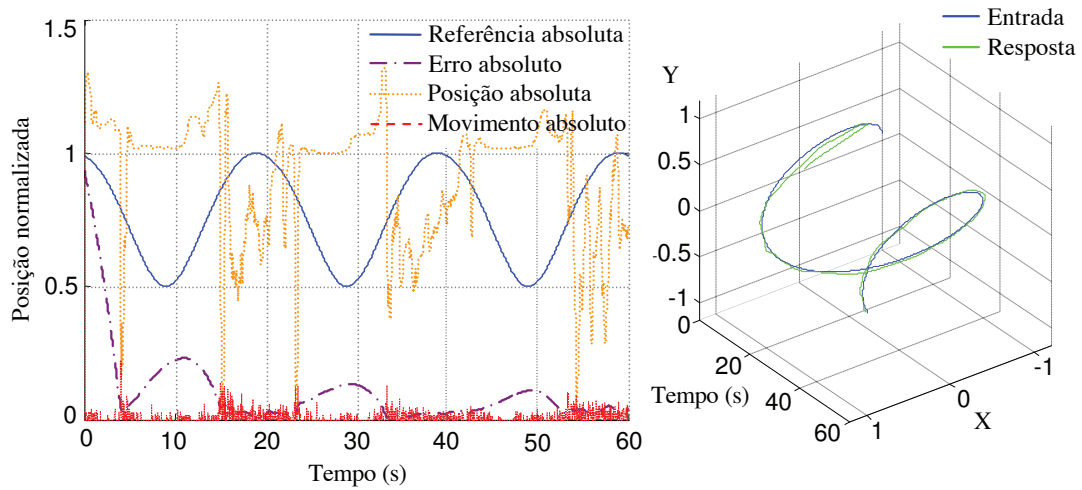


Figura 4.40: Seguimento com processo instável, para um alvo móvel elipsoidal, com compensadores  $C_{AF}(s)$ .

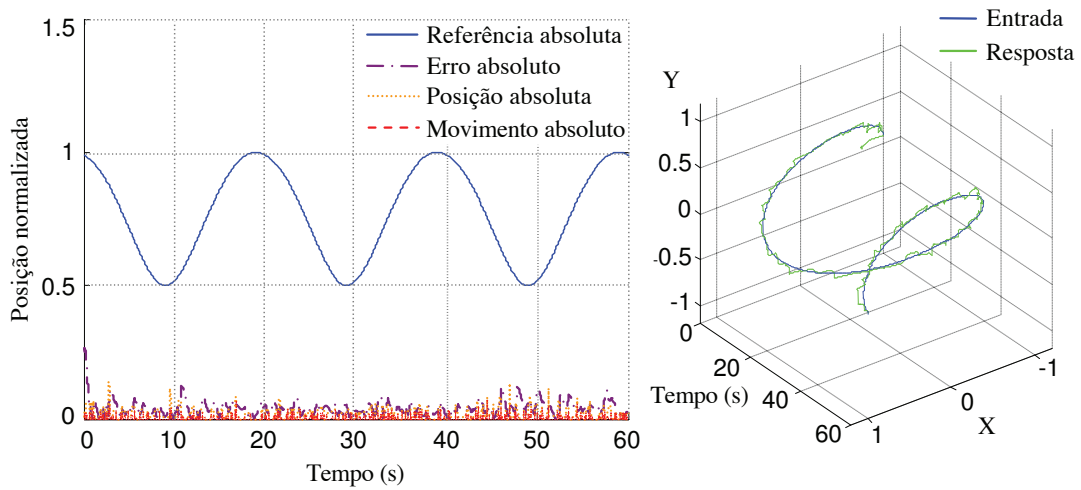


Figura 4.41: Seguimento com processo instável, para um alvo móvel elipsoidal, com compensadores  $C_H(s)$ .

As medidas associadas ao modelo de desempenho baseado na exatidão e no esforço, descrito no capítulo 3 (subsecção 3.5.2), são apresentadas na tabela 4.6. Para a realização da experiência recorreu-se a um sinal de seguimento correspondente a um alvo elipsoidal, centrado na origem, com uma excentricidade de 0,866.

Tabela 4.6: Medidas de exatidão e de esforço para a experiência de seguimento com processo  $P(s)$ , sem e com compensadores  $C_{AF}(s)$  e  $C_H(s)$ .

Sem compensador			Compensadores $C_{AF}(s)$			Compensadores $C_H(s)$		
$M_{QE}$	$M_{QD}$	$T_{MD} (s^{-1})$	$M_{QE}$	$M_{QD}$	$T_{MD} (s^{-1})$	$M_{QE}$	$M_{QD}$	$T_{MD} (s^{-1})$
0,182	0,205	1,880	0,104	0,913	0,793	0,041	0,018	0,154

A análise dos resultados da tabela 4.6 e das figuras 4.39, 4.40 e 4.41 revela uma melhoria significativa do desempenho, do esforço manual e da estabilidade, sobretudo quando o compensador  $C_H$  é utilizado juntamente com a dinâmica de processo, significando também que o operador demora menos tempo a tornar-se perito. Os fatores de diminuição de  $M_{QE}$ ,  $M_{QD}$  e  $T_{MD}$  com o compensador  $C_H$  são, respetivamente, 4,44, 11,39 e 12,21. A abordagem seguinte será obter modelos humano-máquina mais exatos, que possam cobrir as dependências de entrada/saída entre diferentes eixos, complementados com metodologias de controlo ótimo e robusto.

#### 4.4.2 Modelo MIMO e controlador humano-máquina

Nesta subsecção descrevem-se os resultados obtidos para as estratégias de modelagem e de controlo adotadas para ambientes bidimensionais, que resultam da combinação de métodos de identificação em espaço de estados e da análise em frequência, tendo em conta ainda a abordagem de controlo ótimo. São consideradas as três metodologias de modelagem multivariável, descritas no capítulo 3 (subsubsecções 3.3.5.2 a 3.3.5.4). É proposto o sinal normalizado de seguimento, formado pela soma de 30 frequências, e cujas características de espetro e evolução temporal são ilustradas nas figuras 4.42 e 4.43.

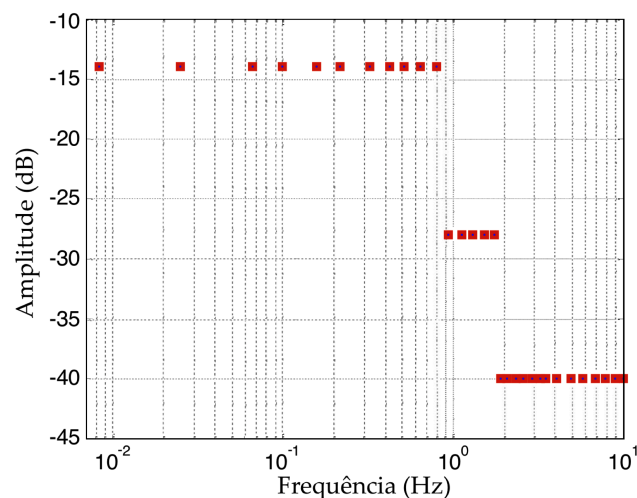


Figura 4.42: Espetro de amplitude de um sinal de entrada para seguimento, gerado a partir da soma de 30 frequências múltiplas ( $N_S = 30$ ), compreendidas entre 0,0083 Hz e 10 Hz.

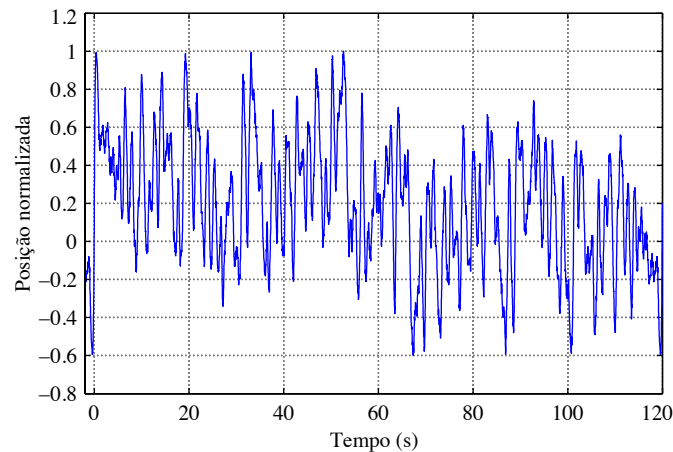


Figura 4.43: Sinal normalizado de entrada para uma experiência de seguimento. O período  $T$  é 120 segundos e o deslocamento  $x_0$  é 0,2.

Para o desenvolvimento do modelo do sistema humano-máquina em espaço de estados, foram realizadas 50 experiências de seguimento com uma duração  $T$  de 120 segundos cada, por um participante sem historial de doenças neurológicas. É novamente assegurado o descanso mínimo de, pelo menos cinco minutos, entre as experiências.

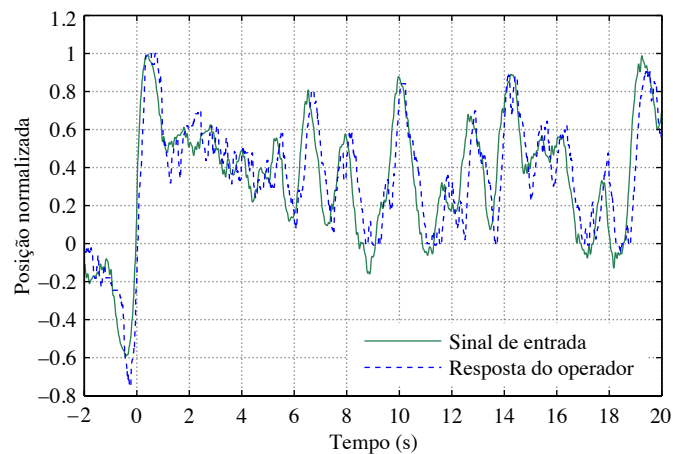


Figura 4.44: Entrada e resposta no domínio do tempo (primeiros 20 segundos) de uma experiência de seguimento manual, para o eixo Y.

#### 4.4.2.1 Modelos com base em entradas e saídas independentes

O procedimento para a modelagem MIMO, a partir dos dados das entradas e das saídas independentes, comporta a realização de dois conjuntos de 25 experiências de seguimento em perseguição, que são feitos alternadamente e de forma independente para cada eixo.

Para caracterizar o sistema humano-máquina a partir dos dados adquiridos, são obtidos, através do método melhorado de análise em frequência e do procedimento de manipulação inversa, descritos no capítulo 3 (subsecção 3.3.5 e subsubsecção 3.3.5.1), dois modelos nominais de ganho

em anel aberto independentes, correspondentes às funções de transferência  $M_{yy}(s)$  e  $M_{xx}(s)$ , conforme as figuras 4.45 e 4.46. As barras verticais de erro mostram os limites de ganho, para cada uma das frequências utilizadas, considerando um intervalo de confiança de dois desvios padrão ( $\pm 2\sigma$ ).

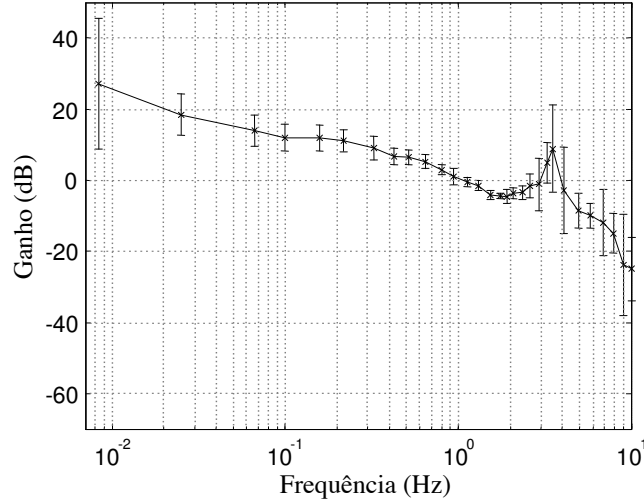


Figura 4.45: Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando  $M_{yy}(s)$ .

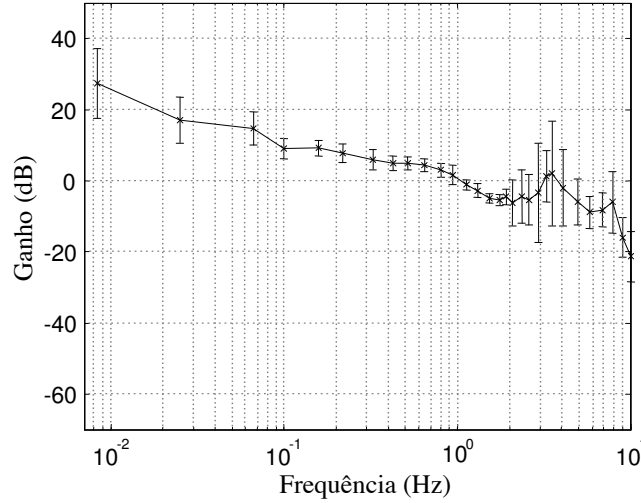


Figura 4.46: Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando  $M_{xx}(s)$ .

Assume-se que o ganho é similar para ambos os eixos, sendo proposto, através de simulação em ambiente MATLAB®/Simulink®, um único modelo simplificado (4.24) de aproximação do sistema humano-máquina. Deste modo, o modelo multidimensional correspondente em anel aberto não irá refletir qualquer dependência entre eixos.

$$M(s) = \begin{bmatrix} M_{xx}(s) & 0 \\ 0 & M_{yy}(s) \end{bmatrix} \quad M_{xx}(s) \approx M_{yy}(s) \approx \frac{3667}{s^3 + 4,5s^2 + 527s + 679} \quad (4.24)$$

#### 4.4.2.2 Modelos com base em entradas independentes e saídas multidimensionais

O procedimento experimental utilizado para a técnica de modelagem MIMO, com entradas independentes e saídas multidimensionais, consiste na realização, de forma alternada, de dois conjuntos iguais de 25 experiências de seguimento em perseguição a 1D, com a duração de 120 segundos cada, usando o mesmo participante humano, tal como no procedimento anterior (subsubseção 4.4.2.1).

A partir dos dados completos para ambos os eixos cartesianos X e Y, são obtidos para o sistema humano-máquina quatro modelos de anel aberto (funções de transferência  $M_{yy}(s)$ ,  $M_{yx}(s)$ ,  $M_{xx}(s)$  e  $M_{xy}(s)$ ), através do método melhorado de análise em frequência e do procedimento de manipulação inversa.

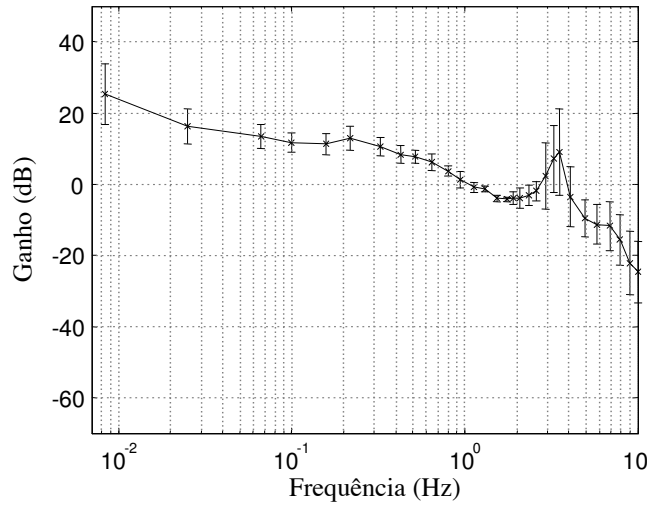


Figura 4.47: Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando  $M_{yy}(s)$ .

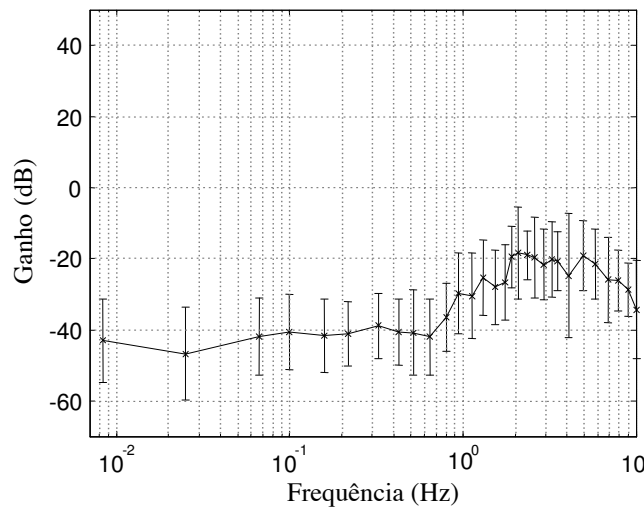


Figura 4.48: Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando  $M_{yx}(s)$ .



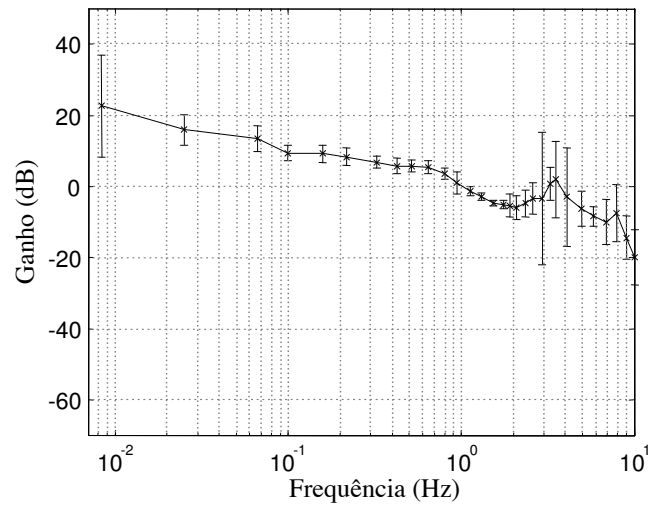


Figura 4.49: Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando  $M_{xx}(s)$ .

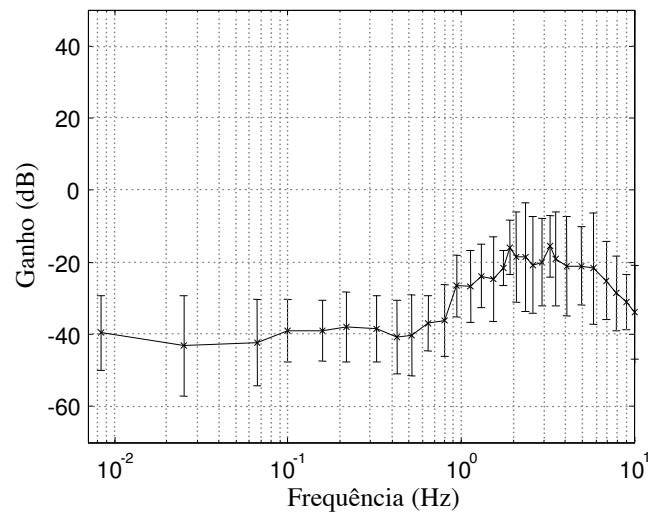


Figura 4.50: Diagrama de Bode de ganho em anel aberto, representando  $M_{xy}(s)$ .

Dos resultados das figuras 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50 verifica-se que o comportamento de ganho das funções de transferência  $M_{xy}(s)$  e  $M_{yx}(s)$  pode ser desprezado face ao comportamento de ganho de  $M_{xx}(s)$  e  $M_{yy}(s)$ .

#### 4.4.2.3 Modelos com base em entradas e saídas multidimensionais

O procedimento experimental para a modelagem MIMO, com entradas e saídas multidimensionais, considera um conjunto de 25 experiências de seguimento em perseguição a 2D, cada uma, com a duração total de 140 segundos. A figura 4.51 ilustra os espectros de amplitude dos sinais de seguimento utilizados para cada eixo.

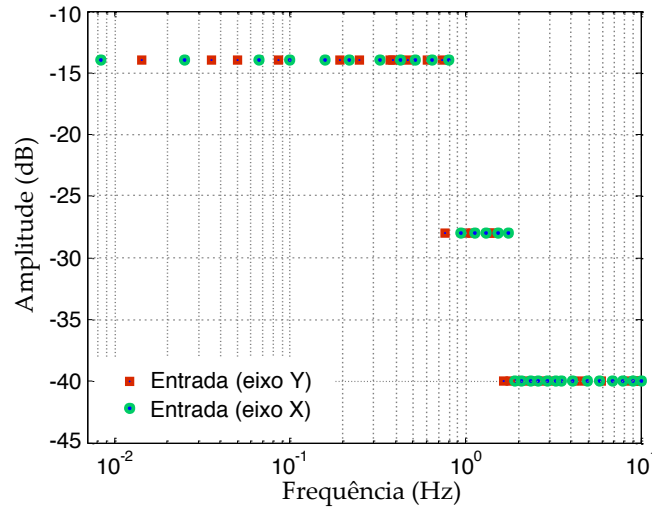


Figura 4.51: Espectros de amplitude para os sinais de entrada de seguimento relativos ao eixo Y e ao eixo X, gerados a partir da soma de frequências múltiplas ( $N_S = 30$ ), compreendidas entre 0,0083 Hz e 10 Hz.

Os dois sinais de entrada de seguimento possuem diferentes períodos ( $T_1 = 120$  s e  $T_2 = 140$  s) e são construídos a partir de somas de diferentes frequências angulares múltiplas  $\omega_k$ , para assegurar respostas não correlacionadas para os eixos X e Y.

Os diagramas de Bode de ganho em anel aberto para o sistema humano-máquina, considerando o procedimento de modelagem MIMO com entradas e saídas multidimensionais, são apresentados nas figuras 4.52 e 4.53. Estes diagramas de Bode de ganho refletem a incerteza nos modelos, em anel aberto, correspondentes às quatro funções de transferência  $M_{yy}(s)$ ,  $M_{yx}(s)$ ,  $M_{xx}(s)$  e  $M_{xy}(s)$ , que permitem caracterizar o sistema humano-máquina.

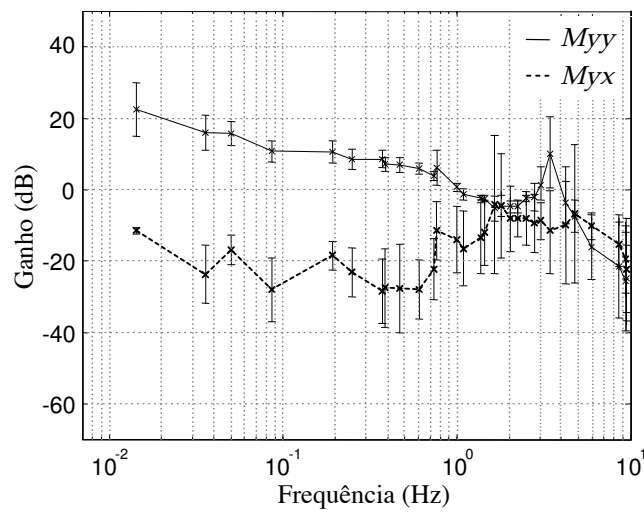


Figura 4.52: Diagramas de Bode de ganho em anel aberto, representando as funções de transferência  $M_{yy}(s)$  e  $M_{yx}(s)$  do sistema humano-máquina.

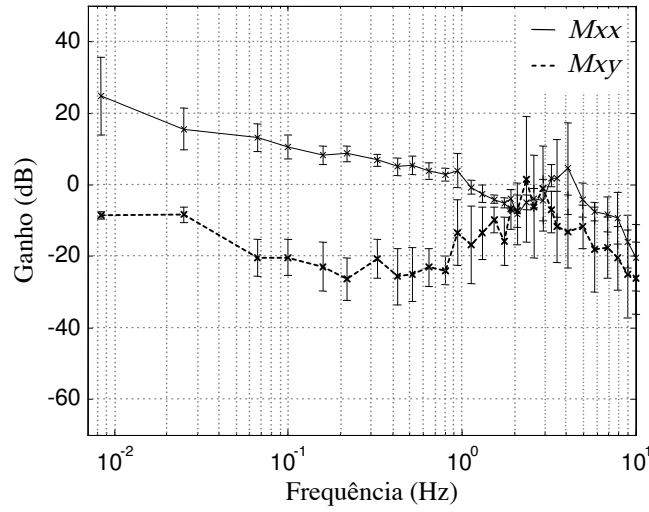


Figura 4.53: Diagramas de Bode de ganho em anel aberto, representando as funções de transferência  $M_{xx}(s)$  e  $M_{xy}(s)$  do sistema humano-máquina.

Os resultados mostram que a dependência entre os eixos é superior à obtida pelo método de modelagem MIMO, com entradas independentes e saídas multidimensionais (subsubsecção 4.4.2.2). No entanto, o efeito de dependência é desprezável na maior parte das frequências, com exceção da gama compreendida entre 1,5 Hz e 3 Hz. O comportamento em anel aberto do ganho para  $M_{yy}(s)$  e  $M_{xx}(s)$  é praticamente idêntico ao comportamento do ganho obtido pelos métodos anteriores. Com base nestes resultados, e também nos da subsubsecção 4.4.1.2, verifica-se que o procedimento simplificado, baseado na metodologia de modelagem MIMO, em anel aberto com entradas e saídas independentes, revelou ser eficiente para a identificação do sistema humano-máquina.

#### 4.4.2.4 Projeto do controlador MIMO humano-máquina

Foi considerado o processo MIMO  $P(s)$  de (4.18), com dinâmicas instáveis (4.17) e o modelo de anel aberto  $M(s)$  de (4.24). Para projetar o controlador ótimo MIMO foi utilizada a técnica de controlo LQG, descrita no capítulo 3 (subsecção 3.4.3). No projeto dos controladores ótimos LQ é tomado em consideração o critério quadrático  $J(r(t))$ , dado por

$$J(r(t)) = \int_0^{\infty} (y^2(t) + \rho r^2(t)) dt \quad (4.25)$$

onde  $\rho$  representa o peso que representa o compromisso entre o esforço de controlo e o desempenho da regulação,  $r(t)$  é o sinal de referência de entrada e  $y(t)$  é o sinal de resposta. Para cada eixo obtém-se um controlador  $C_{LQG}(s)$ , definido em (4.26), com  $\rho = 1 \times 10^{12}$ . Este controlador MIMO foi implementado através da aplicação desenvolvida em ambiente LabVIEW® (figura 4.3), recorrendo ao método de discretização por Retentor de Amostras de Ordem Zero (ZOH).

$$C_{LQG}(s) = \frac{-1,039 \times 10^4 s^4 - 4,683 \times 10^4 s^3 - 5,478 \times 10^6 s^2 - 7,086 \times 10^6 s - 3,667 \times 10^4}{s^5 + 417,100 s^4 + 8,749 \times 10^4 s^3 + 1,137 \times 10^7 s^2 + 9,131 \times 10^8 s + 3,668 \times 10^{10}} \quad (4.26)$$

#### 4.4.2.5 Resultados sem e com controladores

Foi realizado, no Instrumento Virtual LabVIEW® (figura 4.3), uma experiência com 20 segundos de duração, com a utilização do manipulador (figura 4.18.a), sem e com controladores. Para o alvo móvel de seguimento 2D recorre-se a um polígono octógono irregular <sup>10</sup>, centrado na origem. O período de amostragem  $T_s$  é de 10 ms ( $F_s = 100\text{Hz}$ ). É garantido um tempo inicial de 4 segundos, antes do início da experiência, de modo a permitir que o operador humano possa mover no ecrã a posição de saída para a origem. Os resultados experimentais obtidos (Antunes et al., 2013a) são apresentados nas figuras 4.54 a 4.57, mostrando a evolução temporal dos sinais de seguimento (de referência e de resposta do operador humano), e dos valores absolutos da referência, do erro de seguimento, da posição do manipulador e do movimento resultante.

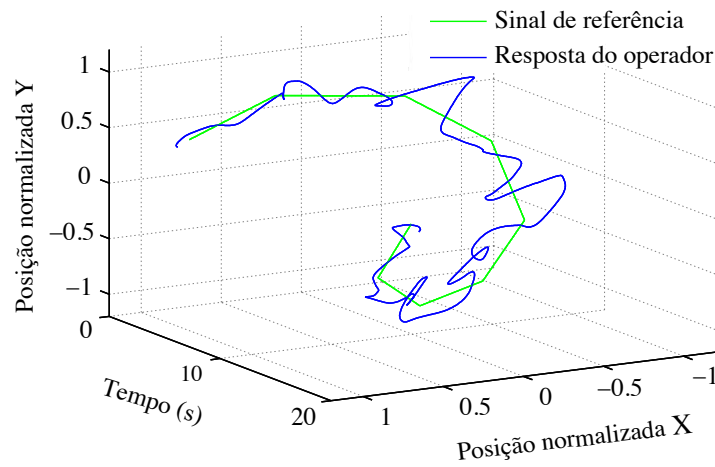


Figura 4.54: Resposta no tempo para um alvo móvel poligonal octogonal de seguimento, com processo instável, sem controlador.

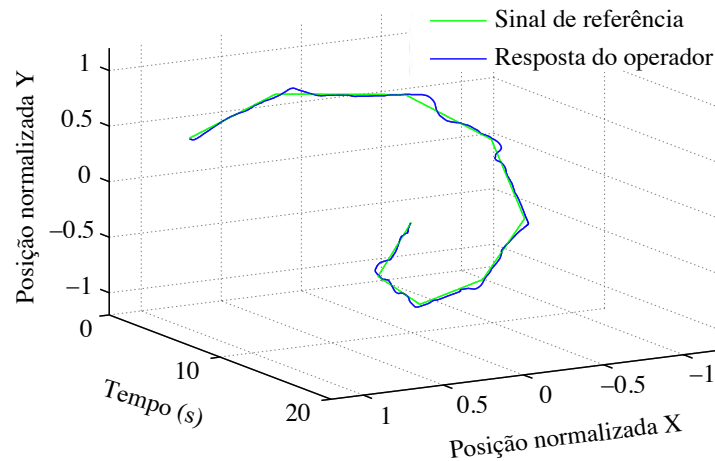


Figura 4.55: Resposta no tempo para um alvo móvel poligonal octogonal de seguimento, com processo instável, com os controladores  $C_{LQG}(s)$ .

<sup>10</sup> Nesta situação ter-se-á um sinal de seguimento nem sempre contínuo, possuindo ainda descontinuidades associadas aos vértices da trajetória do alvo móvel.

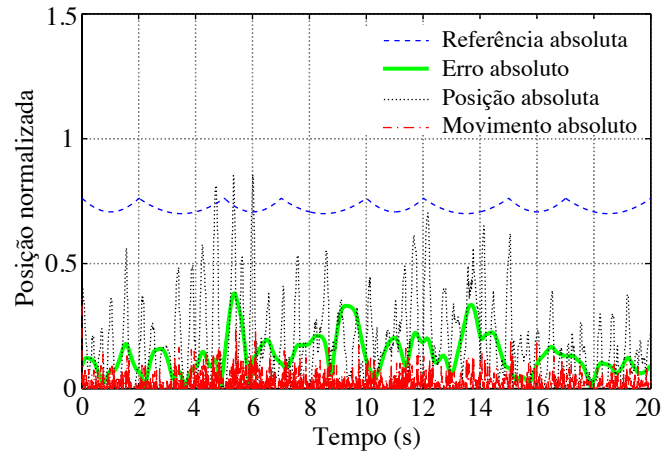


Figura 4.56: Resultados do seguimento com processo instável, sem controlador.

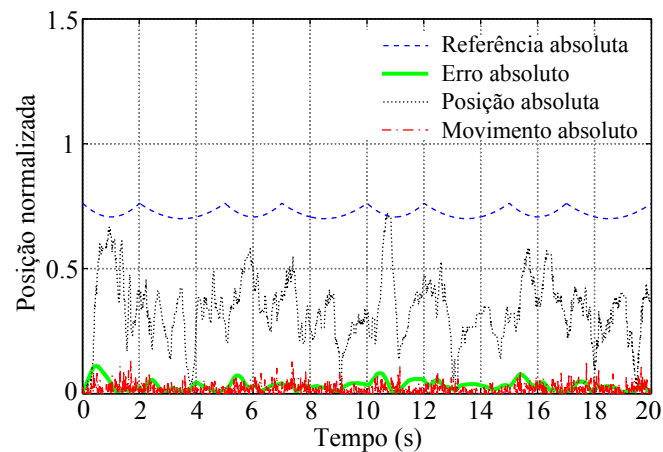


Figura 4.57: Resultados do seguimento com processo instável, com os controladores  $C_{LQG}(s)$ .

Estes resultados (figuras 4.54 a 4.57), confirmam que com os controladores LQG propostos, o desempenho na tarefa de seguimento é consideravelmente melhorado, enquanto que o esforço manual é mantido ou mesmo reduzido, especialmente nas baixas e nas médias frequências <sup>11</sup>. Na tabela 4.7 são apresentadas os valores das medidas de  $M_{QE}$ ,  $M_{QD}$  e  $T_{MD}$ , definidas respetivamente em (3.98), (3.103) e (3.106), relativas ao modelo de desempenho baseado na exatidão e no esforço, descrito no capítulo 3 (subsecção 3.5.2).

Tabela 4.7: Medidas de exatidão e de esforço para a experiência de seguimento com processo instável, sem e com os controladores  $C_{LQG}(s)$ .

Sem controlador			Com controladores $C_{LQG}(s)$		
$M_{QE}$	$M_{QD}$	$T_{MD} (s^{-1})$	$M_{QE}$	$M_{QD}$	$T_{MD} (s^{-1})$
0,135	0,197	2,650	0,031	0,333	1,687

<sup>11</sup> As altas frequências correspondem às mudanças bruscas de direção de seguimento, ou seja, nas zonas associadas aos vértices da trajetória do alvo móvel. A resposta do operador com processo instável não é instantânea, verificando-se que o comportamento de resposta nas discontinuidades não é imediato.

Os fatores de diminuição de  $M_{QE}$  e  $T_{MD}$  com a utilização dos controladores  $C_{LQG}(s)$  são, respectivamente, 4,35 e 1,57. As figuras 4.58.a e 4.58.b mostram a evolução temporal, para uma janela de 2 s, do erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$ , sem e com os controladores  $C_{LQG}(s)$ .

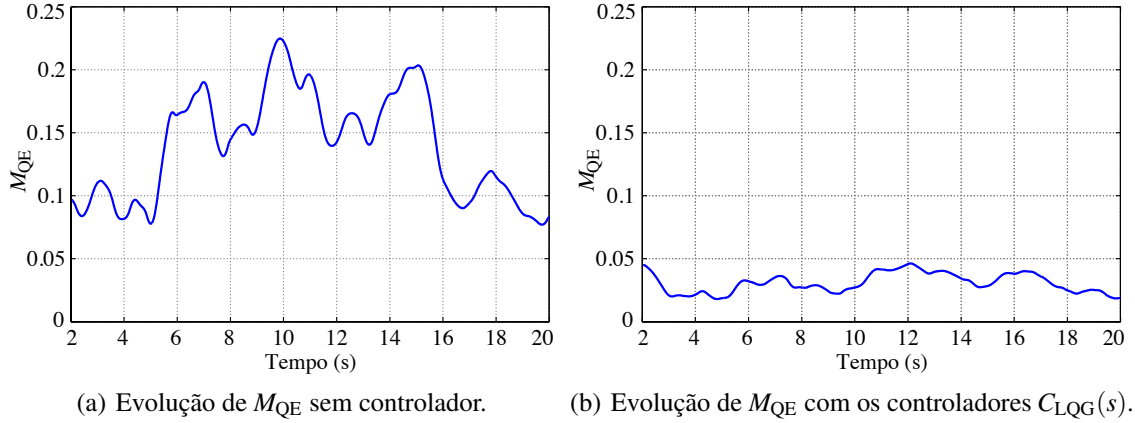


Figura 4.58: Evolução temporal, para uma janela temporal de dois segundos, do erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$  (a) sem controlador; (b) com os controladores  $C_{LQG}(s)$ .

Verifica-se que as respostas do operador, associadas às transições do alvo móvel de seguimento (em  $t = 2, 5, 7, 10, 12, 15, 17$  e  $20$  segundos) são mais rápidas quando são utilizados os controladores  $C_{LQG}(s)$ . O operador humano demora também um menor tempo para adquirir maior perícia na realização da tarefa com o manipulador. A combinação (3.111) das medidas de  $M_{QE}$ ,  $M_{QD}$  e  $T_{MD}$  permite obter um índice de desempenho  $T_{ms}$ . A robustez do controlador face a incertezas nos modelos humano-máquina de anel aberto, para a gama de frequências compreendida entre 0,037 Hz e 10 Hz, pode ser confirmada através da metodologia proposta em Chao & Athans (1999) para obtenção dos limites de incerteza  $B(s)$  de (4.27), assumindo a aproximação diagonal em espaço de estados, embora os dados de anel aberto revelem maior dispersão para as frequências abaixo de 0,037 Hz.

$$B_{xx}(s) = B_{yy}(s) = \frac{319s + 1540}{s + 400} \quad (4.27)$$

Verifica-se assim que a metodologia de modelagem multivariável, baseada na aproximação diagonal em espaço de estados, e a estratégia de controlo ótimo adotada, permitem a melhoria do desempenho do operador humano na execução da tarefa manual de seguimento. No capítulo 3 (subsecção 3.5.4) é descrita uma nova metodologia de análise de desempenho, baseada em Análise em Componentes Principais (PCA), proposta para a quantificação do desempenho durante tarefas manuais de seguimento.

#### 4.4.3 Análise de desempenho baseada em PCA

O diagrama conceptual do modelo PCA de análise de desempenho é ilustrado na figura 4.59, sendo  $r_x(k)$  e  $r_y(k)$  os sinais discretos de seguimento no instante  $k$ , e  $y_x(k)$  e  $y_y(k)$  os correspondentes sinais de resposta do operador, para os eixos X e Y. Utilizando, por exemplo, duas Componentes Principais (PC),  $t_1$  e  $t_2$  correspondem às projecções no plano dessas Componentes Principais.

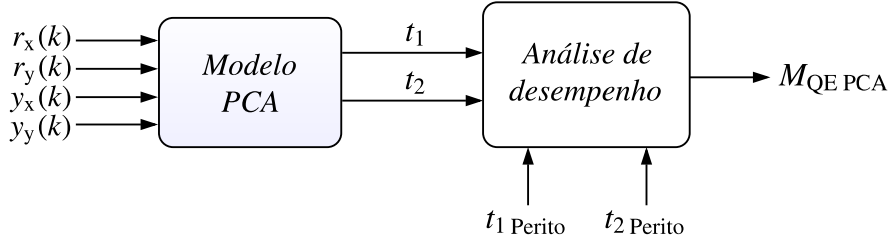


Figura 4.59: Diagrama conceitual do modelo PCA de análise de desempenho.

Os sinais de seguimento criados para a análise PCA de desempenho possuem diferente duração  $T_e$ , para que a dificuldade da tarefa possa ser progressivamente aumentada. Assim, os modelos PCA obtidos são sempre relativos à melhor experiência, correspondendo ao alvo de seguimento mais fácil de seguir. Nesta análise o índice de desempenho  $M_{QE PCA}$  é proposto e comparado com a medida tradicional de desempenho, designadamente o erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$ .

#### 4.4.3.1 Procedimento experimental para PCA

Para a obtenção do modelo PCA de análise de desempenho, descrito no capítulo 3 (subsecção 3.5.4), são realizadas com o manípulo no Instrumento Virtual da figura 4.3 um conjunto de quatro experiências de seguimento em perseguição, sem qualquer controlador de assistência ou dinâmica adicional de processo, para um participante sem historial de doenças neurológicas. A trajetória do alvo de seguimento (figura 4.60), de média centrada na origem, é criada a partir da soma de dois conjuntos de sinusoides  $r_x(k)$  e  $r_y(k)$  de (4.28 e 4.29), e possui uma duração entre 5 e 20 segundos ( $T_e = \{5s, 10s, 15s, 20s\}$ ).

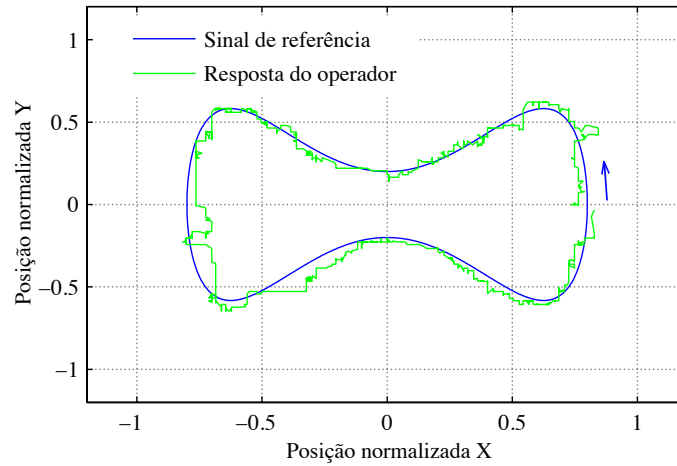


Figura 4.60: Alvo de seguimento e resposta do operador, para o modelo PCA de análise de desempenho.

$$r_x(k) = 0,6 \cos\left(\frac{2\pi(k-1)}{F_s T_e}\right) + 0,2 \cos\left(\frac{2\pi(k-1)}{F_s T_e}\right) \quad (4.28)$$

$$r_y(k) = 0,5 \sin\left(\frac{2\pi(k-1)}{F_s T_e}\right) + 0,3 \sin\left(\frac{6\pi(k-1)}{F_s T_e}\right) \quad (4.29)$$

A frequência de amostragem  $F_s$  é 100 Hz. A dificuldade da experiência de seguimento é aumentada quando a duração  $T_e$  dos sinais a seguir é diminuída, sendo que, para um mesmo operador, os resultados obtidos para a tarefa de maior duração (20 segundos) (figuras 4.61 e 4.62) conduzem ao melhor desempenho. Considera-se assim, a tarefa de seguimento de maior duração como a associada ao operador perito. As restantes tarefas de seguimento, com duração  $T_e = 15$  s,  $T_e = 10$  s e  $T_e = 5$  s (figuras 4.63, 4.64 e 4.65) são classificadas, respetivamente, como as tarefas do Operador com Alto Desempenho (HSO), do Operador com Médio Desempenho (MSO) e do Operador com Baixo Desempenho (LSO). É garantido um atraso inicial de dois segundos, de modo a assegurar, antes do início da experiência, que o operador possa seguir o alvo até à sua posição inicial ( $x = 0,8$  e  $y = 0,0$ ). Para a metodologia PCA de análise de desempenho, a experiência de menor dificuldade, de duração de 20 segundos (figura 4.62), é considerada associada à operação do perito. Os resultados experimentais (Antunes et al., 2014) são apresentados nas figuras 4.61 a 4.65.

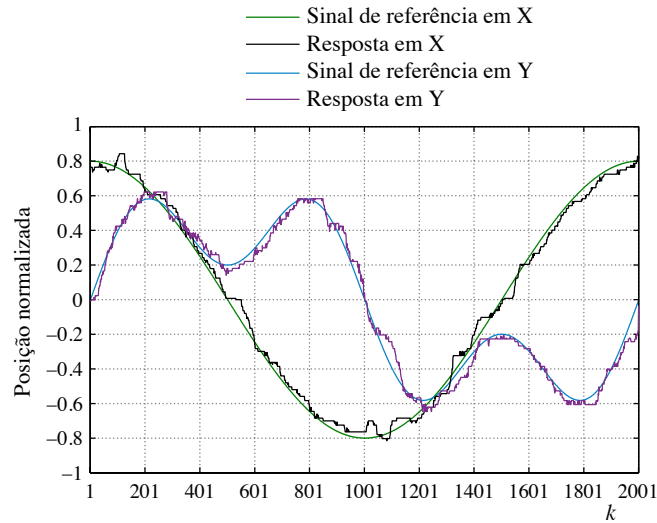


Figura 4.61: Sinal de entrada utilizado para o modelo PCA de análise de desempenho e resposta do operador para o tempo discreto, com duração de 2001 amostras (20 s).

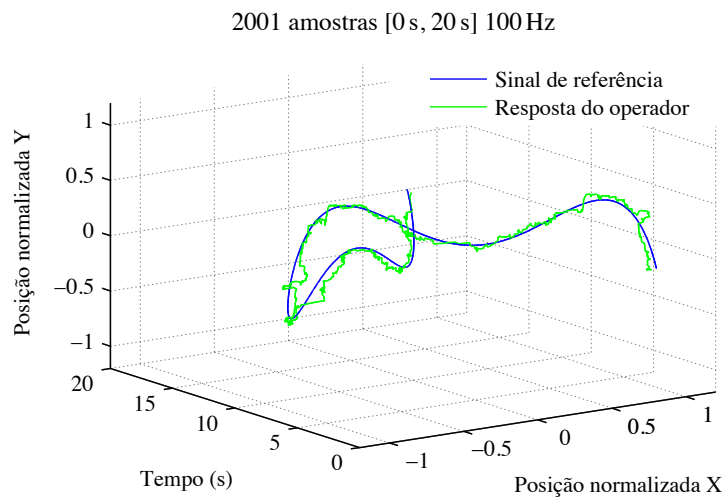


Figura 4.62: Resposta no tempo para o alvo móvel de seguimento com duração temporal  $T_e$  de 20 segundos.



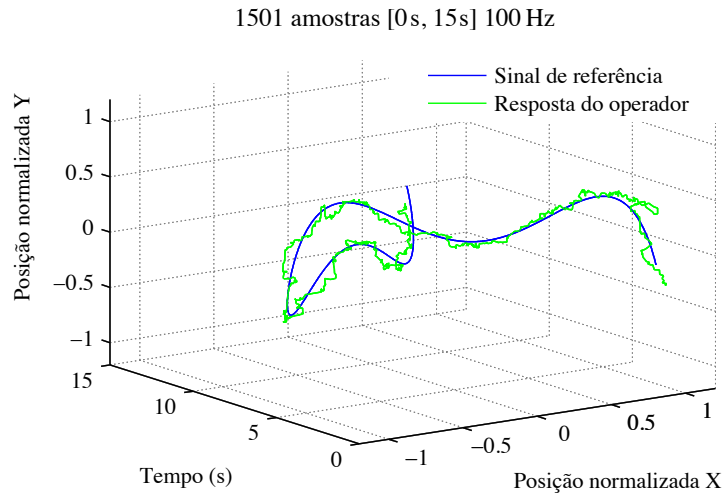


Figura 4.63: Resposta no tempo para o alvo móvel de seguimento com duração temporal  $T_e$  de 15 segundos.

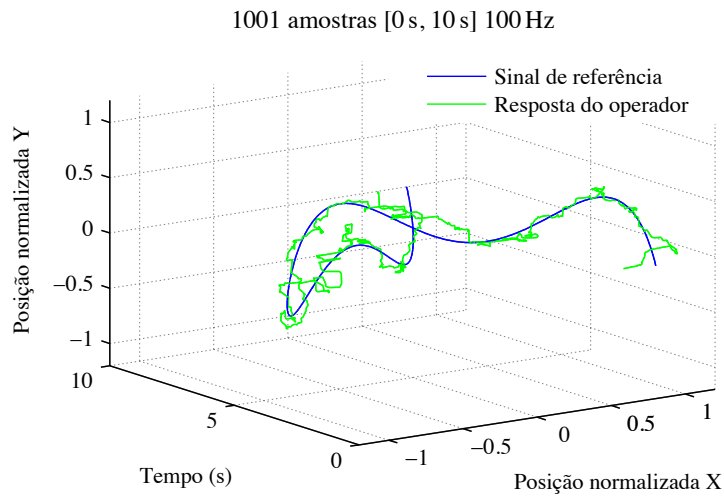


Figura 4.64: Resposta no tempo para o alvo móvel de seguimento com duração temporal  $T_e$  de 10 segundos.

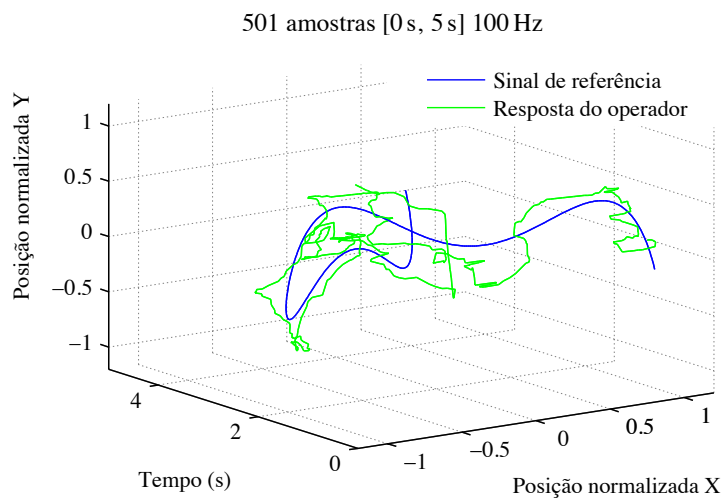


Figura 4.65: Resposta no tempo para o alvo móvel de seguimento com duração temporal  $T_e$  de 5 segundos.

As trajetórias de saída ocorrem no Espaço Bidimensional. A análise de desempenho proposta utiliza o mesmo número de dimensões, tomando em conta os dados do sinal discreto de referência  $\mathbf{r}(k)$  de (4.28), (4.29) e (4.30) e as respostas respectivas de seguimento  $y_x(k)$  e  $y_y(k)$  para os eixos X e Y, pelo que em cada linha da matriz de dados  $\mathbf{X}$  de (4.31) terão de ser incluídas pelo menos quatro variáveis.

$$\mathbf{r}(k) = \begin{bmatrix} r_x(k) & r_y(k) \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$\mathbf{X}(k, :) = \begin{bmatrix} r_x(k) & r_y(k) & y_x(k) & y_y(k) \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

A matriz diagonal  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$  de valores singulares obtida é

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0,6129 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3484 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0010 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0006 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Dos resultados das figuras 4.62 a 4.65 é possível constatar que quando o alvo de referência de entrada é mais rápido, o desempenho da tarefa de seguimento diminui. A figura 4.66 ilustra a projeção dos dados no espaço 2D de pontuações.

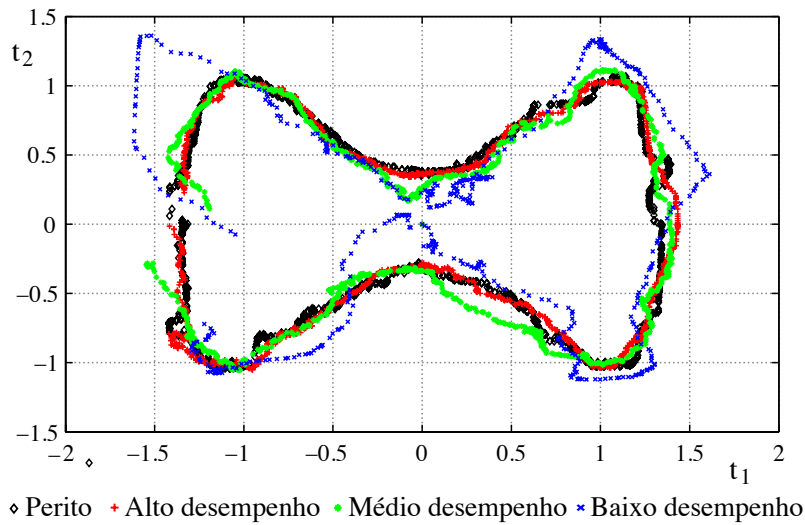


Figura 4.66: Projeção PCA dos dados das experiências no espaço 2D de pontuações (*scores*).

A qualidade do modelo PCA depende do número total de Componentes Principais utilizadas, sendo obtida com base na soma normalizada dos valores singulares da matriz diagonal  $\mathbf{A}$  de (4.32). De acordo com a tabela 4.8, no método PCA com duas Componentes Principais é possível capturar 99,8 % da informação relativa à tarefa. As amostras adquiridas nas quatro experiências são decimadas para o cálculo, no espaço 2D de pontuações, do erro relativo à experiência de maior duração (20 segundos). O índice PCA  $M_{QEPCA}$ , é obtido de maneira análoga a (3.98) (capítulo 3, subsecção 3.5.2.1), mas tendo agora em conta os resultados experimentais associados à experiência de seguimento de 20 segundos e o espaço de projeções no plano das Componentes Principais. O índice de desempenho  $M_{QEPCA}$  é comparado com o erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$ .

Tabela 4.8: Qualidade do modelo PCA *versus* número de Componentes Principais.

Número de Componentes Principais			
1	2	3	4
$\frac{\lambda_1}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i}$	$\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i}$	$\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i}$	$\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i} = 1$
0,637	0,998	0,999	1,000

Nas tabelas 4.9 e 4.10 são apresentados os valores dos índices de desempenho <sup>12</sup>  $M_{QEPCA}$  e  $M_{QE}$  e a variação do erro entre experiências de seguimento consecutivas, de dificuldade crescente, com o mesmo operador humano, considerado respectivamente como: perito, Operador com Alto Desempenho (HSO); Operador com Médio Desempenho (MSO); Operador com Baixo Desempenho (LSO).

Tabela 4.9: Desempenho da tarefa de seguimento, utilizando o método de PCA.

$M_{QEPCA}$			
Perito	HSO	MSO	LSO
0,0000	0,0398	0,0626	0,1816
Variação $M_{QEPCA}$			
—	0,0398	0,0227	0,1191

Tabela 4.10: Desempenho da tarefa de seguimento, utilizando o erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$ .

$M_{QE}$			
Perito	HSO	MSO	LSO
0,0000	0,0216	0,0370	0,1784
Variação $M_{QE}$			
—	0,0216	0,0154	0,1414

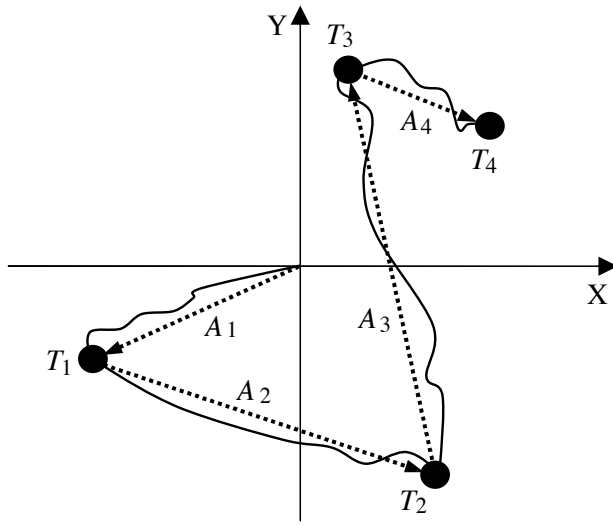
Os resultados confirmam que o método PCA possibilita uma melhor diferenciação do desempenho da tarefa. A metodologia baseada de Análise em Componentes Principais assume uma correlação existente entre todos os sinais da matriz de dados  $\mathbf{X}$ , formada a partir do alvo de entrada multidimensional e da resposta do operador respectiva, para cada experiência.

A análise PCA possibilita, à partida, uma melhor diferenciação do desempenho do operador humano, já que, o modelo PCA, é baseado nos dados da experiência do perito, e todos os dados das experiências são projetados no espaço 2D de pontuações. Logo, pequenas variações nos dados originais adquiridos terão maior relevância nas projeções do espaço de pontuações, permitindo assim uma melhor diferenciação. Por outro lado, atendendo aos resultados das tabelas 4.9 e 4.10, relativos à variação do erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$  entre as experiências de dificuldade crescente, é possível constatar que o índice  $M_{QE}$ , é mais adequado para medir o desempenho em tarefas com maior dificuldade (variação de 0,1414, em comparação com 0,1191), ou que sejam realizadas por operadores com menos perícia.

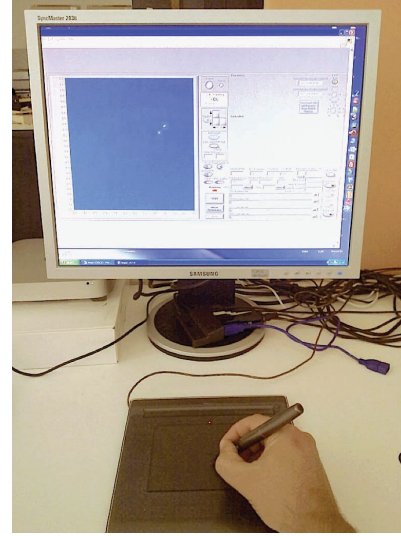
<sup>12</sup> Definidos, respectivamente em cada experiência, no espaço 2D de pontuações e no plano X-Y.

#### 4.4.4 Seguimento ponto-a-ponto

Nas tarefas de seguimento manual em perseguição realizadas por um operador humano, com recurso a uma interface, é normalmente analisada a trajetória do movimento resultante. Noutras atividades de seguimento com intervenção humana interessa também o estudo das ações que implicam o movimento de uma posição inicial para uma posição (alvo de destino) final e a sua duração temporal, independentemente da trajetória tomada. Este tipo de tarefas são normalmente associadas a ações Ponto-a-Ponto (figura 4.67.a).



(a) Exemplo de uma sequência de quatro tarefas PTP ( $N_{PTP} = 4$ ) no plano cartesiano X-Y.



(b) Realização de uma tarefa PTP com a interface *pen tablet* Wacom® Bamboo™.

Figura 4.67: (a) Representação de uma sequência de tarefas Ponto-a-Ponto, com diferentes índices de dificuldade  $I_D$ ; (b) realização de uma tarefa Ponto-a-Ponto com a interface *pen tablet* num processo instável, de dificuldade acrescida.

##### 4.4.4.1 Procedimento experimental

É realizado um conjunto de sequências Ponto-a-Ponto de forma independente, por três operadores humanos sem historial de doenças neurológicas, com recurso a uma *pen tablet*. Estas tarefas consistem na deslocação da posição da interface *pen tablet* para um alvo de destino no ecrã, e após o atingir, no pressionar do botão da *pen tablet*. O diâmetro normalizado  $W$  de cada alvo circular é definido com o valor 0,1, de forma a poder assegurar o sucesso das tarefas. Cada operador executa, com a *pen tablet*, uma sequência de movimentos para atingir 14 alvos aleatórios distintos sobre um processo multidimensional  $P(s)$  predefinido (4.33), cujas dinâmicas (4.34) podem caracterizar, por exemplo, o efeito do movimento de uma massa numa superfície plana com atrito <sup>13</sup>.

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_{xx}(s) & 0 \\ 0 & P_{yy}(s) \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

<sup>13</sup> Relacionado com o polo negativo das funções de transferência  $P_{xx}(s)$  e  $P_{yy}(s)$ .

$$P_{xx}(s) = P_{yy}(s) = \frac{1}{s(s+2)} \quad (4.34)$$

A figura 4.68 ilustra o diagrama de blocos conceptual do sistema humano-máquina, em consideração.

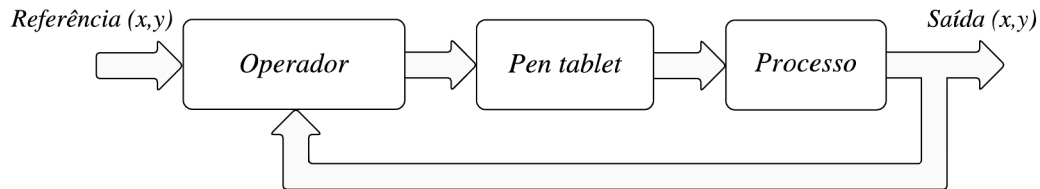
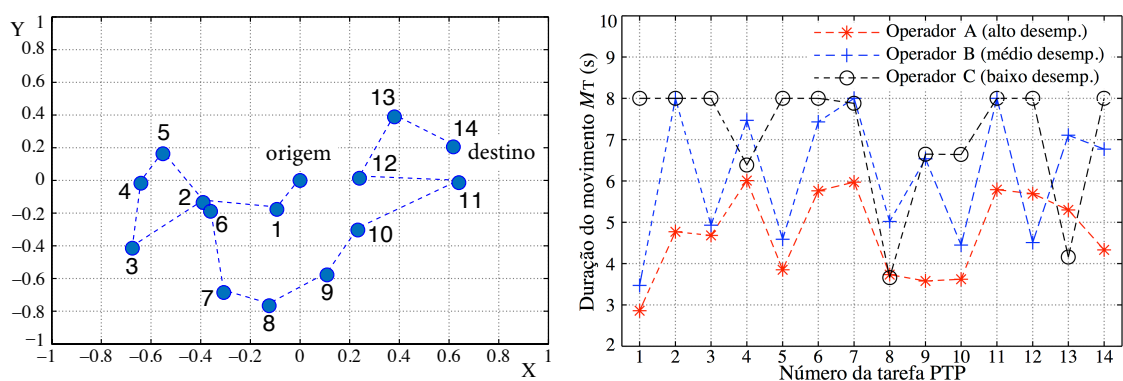


Figura 4.68: Diagrama de blocos conceptual do sistema humano-máquina com a interface *pen tablet*.

São adquiridos os movimentos no ecrã que resultam da utilização da interface *pen tablet* nas tarefas Ponto-a-Ponto, para a quantificação de um índice de desempenho e do compromisso velocidade-exatidão associado à lei de Fitts (3.89), admitindo a formulação de Shannon ( $c = 1$ ). Para cada experiência é registada a duração temporal  $M_T$  do movimento resultante, para atingir cada um dos 14 alvos.

#### 4.4.4.2 Análise de resultados das experiências com a interface *pen tablet*

A sequência espacial dos alvos de seguimento Ponto-a-Ponto a atingir é ilustrada na figura 4.69.a. Na figura 4.69.b é apresentada a duração temporal de cada ação Ponto-a-Ponto para os três participantes humanos (A, B e C). Nas experiências realizadas com a interface *pen tablet* foi verificado que o operador humano A, conseguiu realizar em menos tempo, a sequência de ações Ponto-a-Ponto.



(a) Sequência de 14 ações Ponto-a-Ponto no plano cartesiano X-Y. (b) Duração temporal de cada ação Ponto-a-Ponto, para cada um dos três operadores humanos.

Figura 4.69: Ações Ponto-a-Ponto (PTP), realizadas pelos operadores humanos A, B e C.

Na tabela 4.11 são apresentados os valores dos coeficientes de determinação  $R^2$  (3.93) dos operadores, relacionados com o grau de aproximação à lei de Fitts.

Tabela 4.11: Coeficiente de determinação  $R^2$ , para os operadores humanos A, B e C.

$R^2$		
Operador A	Operador B	Operador C
0,509	0,285	< 0,000

Os valores de  $R^2$  obtidos revelam uma maior aproximação à lei de Fitts para o operador humano que logrou cumprir mais rapidamente as tarefas Ponto-a-Ponto (operador A). Um índice de desempenho  $J_{PTP}$  proposto em (3.97) e (4.35) para este tipo de experiências é

$$J_{PTP} = \left(1 - \frac{\bar{\delta}^2}{8}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{M_{PTP}}{N_{PTP}}}\right) \bar{S}_{PTP} \quad (4.35)$$

sendo de (3.94), (3.95) e (3.96) que

$$\bar{S}_{PTP} = \frac{\sum_{p=1}^{N_{PTP}} A_p}{\sum_{p=1}^{N_{PTP}} T_p} \quad T_p \leq T_m \quad (4.36)$$

Na tabela 4.12 são apresentados os índices de desempenho  $J_{PTP}$  obtidos dos operadores A (HSO), B (MSO) e C (LSO), para as experiências realizadas com a interface *pen tablet* no processo  $P(s)$  de (4.33), sendo  $M_{PTP}$  o número total de falhas associado a cada experiência PTP.

Tabela 4.12: Índice de desempenho  $J_{PTP}$  para os operadores humanos A, B e C.

$J_{PTP}$		
Operador A ( $M_{PTP} = 0$ )	Operador B ( $M_{PTP} = 3$ )	Operador C ( $M_{PTP} = 8$ )
HSO	MSO	LSO
0,073	0,030	0,012

Constatou-se que o desempenho das ações de alcance com a *pen tablet* melhora quando estas são executadas por operadores que mais se aproximam à lei de Fitts (3.89), pelo que a interpretação através da aproximação à lei de Fitts poderá ser uma forma de representar o sistema, em termos de velocidade e exatidão, tendo em conta que a duração do movimento para atingir um determinado alvo depende, simultaneamente, da distância a que este se encontra e da sua largura.

Os resultados obtidos com a interface *pen tablet* revelam uma tendência, que se traduz por índices de desempenho melhores em operadores cujas ações mais se aproximam da lei de Fitts, tal como verificado em Suzuki (2010), constituindo esta lei num preditor do compromisso velocidade-exatidão para os movimentos PTP, mesmo tendo em conta a existência de um processo no anel de controlo, que no caso concreto irá fazer aumentar a dificuldade. Na secção 4.6 são apresentados resultados envolvendo tarefas PTP com alvos aleatórios e determinados, com aplicações à tecnologia assistiva.

## 4.5 Controlo assistido e transferência de conhecimento

Em muitos sistemas de controlo manual é possível constatar que o operador humano depende ainda e em grande parte dos seus sentidos, como a visão e a percepção, pelo que a informação disponível para o projeto de um controlador de assistência poderá não ser à partida suficiente. Nestes casos, a obtenção de modelos para o comportamento dos sistemas que integram os seres humanos poderá ser uma tarefa de elevada complexidade, e outras soluções complementares, como o recurso a técnicas de transferência de aprendizagem/conhecimento deverão também ser tomadas em conta.

As metodologias baseadas em lógica difusa, que possam tirar partido do conhecimento associado ao controlo humano-máquina, constituem alternativas interessantes às abordagens clássicas de modelagem, de identificação e de controlo, dado que o comportamento do operador, devido às suas características não lineares e variantes no tempo, é por vezes difícil de obter quando se executam tarefas complexas. Esta secção descreve os resultados experimentais do projeto de um sistema de controlo humano-máquina de Tempo-Real, tendo como objetivo a melhoria do desempenho da condução. O controlador de assistência proposto (figura 4.70) toma em consideração o conhecimento prévio do especialista, obtido a partir de um operador humano de referência e dos dados obtidos, em Tempo-Real, das interfaces utilizadas (volante e pedais), designadamente, a posição normalizada do volante e as posições normalizadas do acelerador e do travão. Se o conhecimento do operador especialista for utilizado por outro operador, a transferência de aprendizagem/conhecimento é induzida.



Figura 4.70: Ilustração conceptual do sistema de assistência com o condutor Humano Integrado no Anel (Antunes et al., 2017).

Estudos anteriores focam essencialmente o desenvolvimento de controladores para a criação de oponentes operados por computador <sup>14</sup>, através da aprendizagem, por imitação, do estilo de condução em simuladores virtuais de condução, como o *The Open Racing Car Simulator* (TORCS) e o *Simulated Car Racing Championship* (SCRC). Estas plataformas providenciam informação rica, proveniente de muitos sensores virtuais, relacionados com o estado do veículo de corrida, a volta

<sup>14</sup> Designados de *drivatars* na terminologia anglo-saxónica.

e a pista, que pode ser utilizada para a geração de oponentes operados por computador em videojogos e para a assistência ou para sistemas de segurança em automóveis. Nos trabalhos (Butz & Lönneker, 2009; Cardamone et al., 2009; Cichosz & Pawełczak, 2014; Muñoz et al., 2010) foram utilizadas diversas abordagens de modelagem como redes neuronais, modelos estatísticos, árvores de decisão, florestas aleatórias e ainda estratégias de adaptação evolucionária. Esses trabalhos anteriores baseiam-se em técnicas de identificação de sistemas em anel aberto, sendo geralmente aplicados para imitar e otimizar o comportamento de condução de modo a desenvolver, por exemplo, *drivatars* para videojogos.

A abordagem considerada neste trabalho é focada num esquema de assistência em anel fechado com retroação do erro, por forma a assistir o operador/conductor humano. No simulador de condução utilizado a única informação disponível apenas provém da perceção visual do operador humano, em contraste com a informação sensorial rica fornecida por outros simuladores descritos em trabalhos anteriores. O apoio ao operador humano tem por base um controlador de assistência com transferência de aprendizagem/conhecimento, implementado em *hardware*. São propostos novos contributos para a assistência humano-máquina, suportados por um conjunto de experiências de condução e testes realizados com diferentes participantes humanos, utilizando técnicas de análise de correlação descritas no capítulo 3 (subsubsecção 3.4.4.1), sendo inferida uma condição para a transferência de aprendizagem/conhecimento entre operadores.

#### 4.5.1 Análise de correlação

Em competições de automóveis a análise de correlação dos quatro sinais discretizados relativos à “posição do volante”, à “posição absoluta do volante”, à “aceleração” e à “travagem”, para um condutor humano de referência (U) e outro condutor humano (V), pode ser efetuada a partir dos dados obtidos das experiências de condução cujos tempos de realização  $T_{VO}$  sejam semelhantes, para que o número de amostras possa ser o mais possível idêntico. As matrizes de correlação dos quatro sinais das interfaces volante e pedais, para os condutores genéricos V e U, são definidas respetivamente por

$$\mathbf{R}_V = \begin{bmatrix} 1 & v_{12} & v_{13} & v_{14} \\ v_{12} & 1 & v_{23} & v_{24} \\ v_{13} & v_{23} & 1 & v_{34} \\ v_{14} & v_{24} & v_{34} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

$$\mathbf{R}_U = \begin{bmatrix} 1 & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{12} & 1 & u_{23} & u_{24} \\ u_{13} & u_{23} & 1 & u_{34} \\ u_{14} & u_{24} & u_{34} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

A matriz residual  $\mathbf{R}_W = \mathbf{R}_V - \mathbf{R}_U$  é obtida por

$$\mathbf{R}_W = \begin{bmatrix} 0 & (v_{12} - u_{12}) & (v_{13} - u_{13}) & (v_{14} - u_{14}) \\ (v_{12} - u_{12}) & 0 & (v_{23} - u_{23}) & (v_{24} - u_{24}) \\ (v_{13} - u_{13}) & (v_{23} - u_{23}) & 0 & (v_{34} - u_{34}) \\ (v_{14} - u_{14}) & (v_{24} - u_{24}) & (v_{34} - u_{34}) & 0 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$



Cada participante, sem historial de doenças neurológicas, realiza 10 voltas consecutivas no simulador de condução de Fórmula 1 (F1) (figura 4.71). Após a conclusão das 10 voltas é escolhida, a partir dos dados adquiridos, a volta mais rápida para cada um dos condutores (A a J). É assegurado, a todos os participantes humanos, um treino prévio de cerca de 10 voltas no simulador, antes do início da fase de aquisição, sendo as condições do veículo de Fórmula 1 idênticas. Após o treino é escolhida na fase de aquisição a melhor volta, dado que corresponde ao melhor comportamento de condução para atingir o menor tempo de finalização  $T_{VO}$  numa volta.

Em experiências prévias no simulador, com apenas dois participantes (Antunes et al., 2015), foi confirmado que o condutor A revela melhor desempenho que o condutor B quanto ao tempo de finalização, sendo considerada a sétima volta do condutor A, terminada em 98,59 s, como a melhor volta desse condutor de referência. A figura 4.72 ilustra os sinais adquiridos das interfaces volante e pedais para as melhores voltas dos condutores A e B no simulador, cumpridas respetivamente em 98,59 s e 105,05 s.



Figura 4.71: Simulador de condução de Fórmula 1 (Antunes et al., 2015; Antunes et al., 2017).

As matrizes de correlação para os condutores B e A são definidas respetivamente por

$$\mathbf{R}_B = \begin{bmatrix} 1,000 & 0,214 & -0,270 & 0,145 \\ 0,214 & 1,000 & -0,345 & 0,001 \\ -0,270 & -0,345 & 1,000 & -0,532 \\ 0,145 & 0,001 & -0,532 & 1,000 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

e

$$\mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} 1,000 & 0,095 & -0,262 & 0,252 \\ 0,095 & 1,000 & -0,365 & 0,161 \\ -0,262 & -0,365 & 1,000 & -0,719 \\ 0,252 & 0,161 & -0,719 & 1,000 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

sendo  $\mathbf{R}_B$  e  $\mathbf{R}_A$  calculadas a partir dos dados dos ensaios dos condutores B e A que revelaram sem controlador de assistência tempos similares numa volta (respetivamente 107,28 s e 107,55 s), utilizando 10729 amostras para a análise de correlação e desprezando apenas a diferença final de

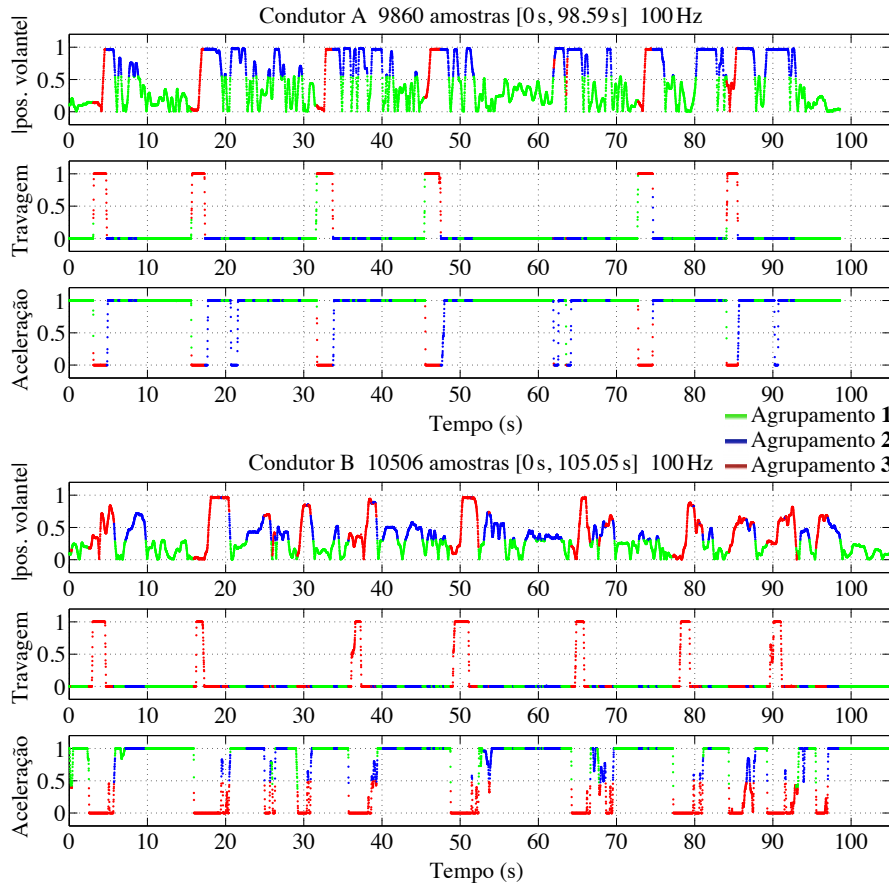


Figura 4.72: Respostas do condutor A e do condutor B numa volta completa da pista virtual de *Albert Park* (Austrália), para uma frequência de amostragem de 100 Hz.

amostras entre os dois ensaios escolhidos <sup>15</sup>. A matriz residual  $\mathbf{R}_W = \mathbf{R}_B - \mathbf{R}_A$  obtida é

$$\mathbf{R}_W = \begin{bmatrix} 0,000 & 0,119 & -0,008 & -0,107 \\ 0,119 & 0,000 & 0,020 & -0,160 \\ -0,008 & 0,020 & 0,000 & 0,187 \\ -0,107 & -0,160 & 0,187 & 0,000 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

A condição para a transferência de aprendizagem/conhecimento, proposta no capítulo 3 (subsecção 3.4.4.1), teve por base os diversos testes experimentais efetuados no simulador de condução, sendo expressa por

$$|R_{val}| \leq 1 \quad (4.43)$$

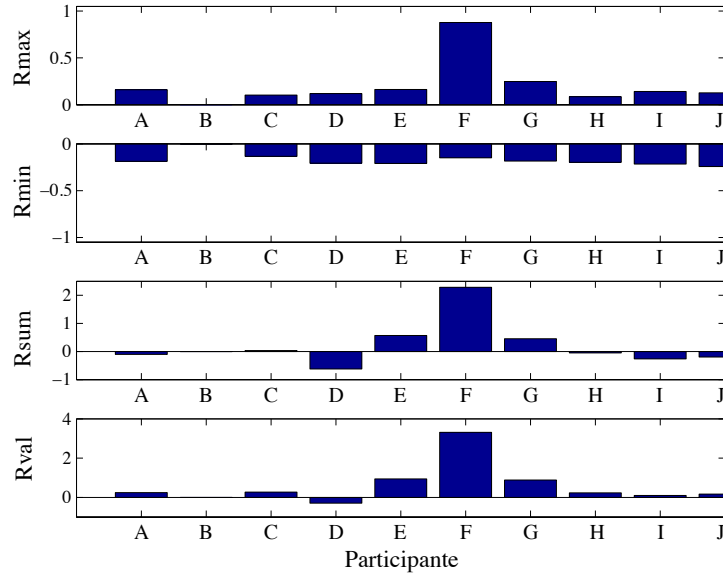
com  $\varsigma = 1$  e  $R_{val}$  (3.76 e 4.43) definido por

$$R_{val} = (R_{max} - R_{min}) + R_{sum} \quad (4.44)$$

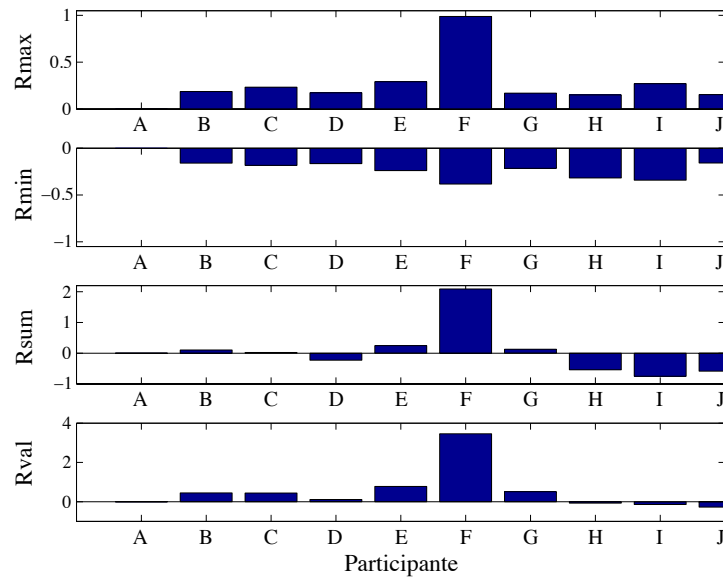
sendo  $R_{sum}$  a soma de todos os elementos da matriz residual  $\mathbf{R}_W$  de (4.42), e  $R_{max}$  e  $R_{min}$  respetivamente o valor máximo e mínimo de  $\mathbf{R}_W$ . Nas figuras 4.73.a e 4.73.b são apresentados os valores dos resíduos  $R_{max}$ ,  $R_{min}$ ,  $R_{sum}$  e  $R_{val}$ , calculados para os condutores humanos B e A de

<sup>15</sup> Que corresponde no caso particular às últimas 27 amostras (0,25 % do total das 10756 amostras).

referência, aos quais entram também em conta os quatro tipos de sinais adquiridos <sup>16</sup> para todos os condutores (A a J).



(a) Resíduos para o condutor humano B.



(b) Resíduos para o condutor humano A.

Figura 4.73: Resíduos  $R_{\max}$ ,  $R_{\min}$ ,  $R_{\text{sum}}$  e  $R_{\text{val}}$  para os condutores B e A de referência.

O condutor humano B está correlacionado com o condutor humano A em termos do comportamento dinâmico de condução, dado que a matriz residual  $R_W$  satisfaz a condição de transferência

<sup>16</sup> Relativos à posição do volante, à posição absoluta do volante, à aceleração e à travagem.

de aprendizagem/conhecimento (4.43 e 4.44). Assumindo que os participantes B e A são os condutores de referência, a condição proposta de transferência de aprendizagem/conhecimento foi testada para todos os participantes (A a J), nas experiências com o simulador de condução, sem recurso ao controlador de assistência, conforme as tabelas 4.13 e 4.14, e as figuras 4.73.a e 4.73.b, verificando-se que o condutor F é o único participante humano que não satisfaz a condição de transferência de aprendizagem/conhecimento, dado que  $|R_{\text{val}}| > 1$ .

Tabela 4.13: Resíduos para o condutor de referência B.

	$R_{\text{max}}$	$R_{\text{min}}$	$R_{\text{sum}}$	$R_{\text{val}}$
Condutor A	0,1597	-0,1866	-0,1024	0,244
Condutor B	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
Condutor C	0,1034	-0,1332	0,0367	0,273
Condutor D	0,1196	-0,2071	-0,6190	-0,292
Condutor E	0,1623	-0,2089	0,5699	0,941
Condutor F	0,8776	-0,1493	2,2837	3,311
Condutor G	0,2478	-0,1840	0,4537	0,886
Condutor H	0,0863	-0,1979	-0,0501	0,234
Condutor I	0,1419	-0,2154	-0,2606	0,097
Condutor J	0,1269	-0,2426	-0,1979	0,172

Tabela 4.14: Resíduos para o condutor de referência A.

	$R_{\text{max}}$	$R_{\text{min}}$	$R_{\text{sum}}$	$R_{\text{val}}$
Condutor A	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
Condutor B	0,1866	-0,1597	0,1024	0,449
Condutor C	0,2333	-0,1847	0,0217	0,440
Condutor D	0,1736	-0,1658	-0,2290	0,110
Condutor E	0,2912	-0,2399	0,2446	0,776
Condutor F	0,9888	-0,3828	2,0892	3,461
Condutor G	0,1689	-0,2156	0,1272	0,512
Condutor H	0,1515	-0,3182	-0,5419	-0,072
Condutor I	0,2700	-0,3429	-0,7522	-0,139
Condutor J	0,1535	-0,1587	-0,5862	-0,274

#### 4.5.2 Sintonia do controlador de assistência

Os ganhos do controlador PID (4.45) de assistência com transferência de conhecimento são dimensionados de acordo com a estratégia descrita no algoritmo 3.5, tendo em conta os resultados obtidos do método de agrupamento FCM (algoritmo 3.4) aplicado à melhor volta dos condutores A e B. Estes métodos encontram-se descritos em detalhe no capítulo 3 (subsecção 3.4.4).

$$C_{\text{PID}}(z) = K_p + K_i T_s \frac{1}{z-1} + K_d \frac{N_{\text{PID}}}{1 + N_{\text{PID}} T_s \left(\frac{1}{z-1}\right)} \quad (4.45)$$

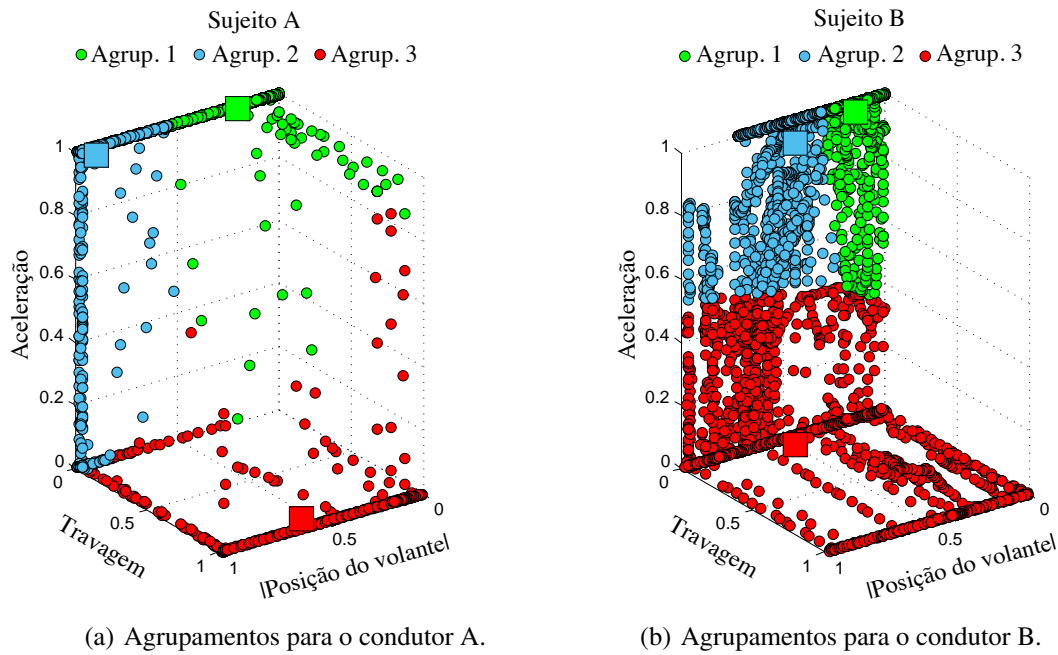


Figura 4.74: Agrupamentos obtidos para as amostras da melhor volta do: (a) condutor A; (b) condutor B.

As figuras 4.74.a e 4.74.b mostram os agrupamentos obtidos para as melhores voltas dos condutores humanos A e B, revelando padrões de condução distintos. Na tabela 4.15 são apresentados os valores calculados dos centroides dos agrupamentos resultantes do algoritmo FCM. Os ganhos proporcionais  $K_{p_i}$  do controlador PID (4.45) de assistência de comutação são calculados através do método de agrupamento FCM com  $C = 3$ ,  $q_{\text{FCM}} = 2$  e o critério de terminação  $\varepsilon = 1 \times 10^{-5}$ . Os centroides dos agrupamentos correspondem aos seis “cubos” das figuras 4.74.a e 4.74.b.

Tabela 4.15: Centroides dos agrupamentos 1, 2 e 3 para o condutor A e o condutor B.

FCM	Retas (agrupamento 1)	Curvas leves (agrupamento 2)	Curvas apertadas (agrupamento 3)
	$( P_{V_b} ; \text{Travagem}; \text{Aceleração})$	$( P_{V_b} ; \text{Travagem}; \text{Aceleração})$	$( P_{V_b} ; \text{Travagem}; \text{Aceleração})$
Condutor A	(0,207; 0,003; 0,994)	(0,900; 0,003; 0,973)	(0,551; 0,935; 0,008)
Condutor B	(0,149; 0,011; 0,976)	(0,458; 0,022; 0,934)	(0,554; 0,164; 0,036)

Dos resultados da tabela 4.15 e da figura 4.74.a, referentes aos centroides dos agrupamentos da melhor volta do condutor A no simulador de condução de Fórmula 1, verifica-se que o valor absoluto normalizado da posição do volante  $|P_V|$  é 0,207 para o primeiro estado de condução (agrupamento 1, retas). Para o segundo estado (agrupamento 2, curvas leves) o valor correspondente absoluto da posição normalizada do volante é 0,900 e para o terceiro estado (agrupamento 3, curvas apertadas) o valor correspondente de  $|P_V|$  é 0,551. Tomando os valores calculados dos centroides para o condutor de referência A, considerado um condutor especialista, os ganhos proporcionais do controlador de comutação para os três estados de condução são respetivamente  $\{K_{p_1}; K_{p_2}; K_{p_3}\}$ , com  $K_{p_1} = 0,80$  (sintonizado para o desempenho nas retas),  $K_{p_2} = 3,48$  e  $K_{p_3} = 2,13$ , sendo estes proporcionais às projeções dos centroides na posição absoluta do volante  $\{0,207; 0,900; 0,551\}$ .

Ex:  $K_{p2} = \left( \frac{0,900}{0,207} \times 0,80 \right) = 3,48$ . Um procedimento similar pode ser adotado utilizando as projeções dos centroides do condutor humano B na posição absoluta do volante  $\{0,149; 0,458; 0,554\}$  (tabela 4.15 e figura 4.74.b), correspondendo a  $K_{p1} = 0,80$ ,  $K_{p2} = 2,46$  e  $K_{p3} = 2,97$ .

O critério principal para a obtenção do valor do ganho integral  $K_i$  foi a redução significativa do esforço nas curvas apertadas. Foi estabelecido que numa curva apertada a saturação da posição normalizada do volante ( $P_{V_b} = \pm 1$ ) ocorre para um ângulo de saturação  $\phi_{sat_b}$  de viragem do volante de respetivamente  $\pm 30^\circ$  (figura 4.75 e tabela 4.16). Deste modo, o valor 1 foi experimentalmente obtido para  $K_i$ . Para uma situação de condução idêntica (curvas apertadas) sem controlador, a saturação normalizada do volante apenas ocorre para um ângulo de viragem de  $\pm 120^\circ$  ((4.46) e tabela 4.16). O conjunto de posições  $P_{V_b}$  normalizadas do volante é definido em (4.47).



Figura 4.75: Ângulo de viragem  $\phi_v$  do volante e posições normalizadas (travagem e aceleração) dos pedais do simulador de condução.

Um termo integral de reinício do controlador PID é desencadeado para as situações de entrada em retas. Para este objetivo foi estabelecido um limiar de 0,07 para o valor absoluto da posição normalizada  $|P_{V_b}|$  do volante. Nas retas  $|P_{V_b}| \simeq 0$ , sendo neste caso a componente proporcional o único termo ativo do controlador PID de assistência.

$$\phi_{sat_b} \in \{\pm 120^\circ, \pm 60^\circ, \pm 50^\circ, \pm 30^\circ\} \quad b = 1, \dots, 4 \quad b \in \mathbb{N}^+ \quad (4.46)$$

$$\begin{cases} P_{V_b} = \frac{\phi_v}{\phi_{sat_b}} & \text{se } |\phi_v| \leq |\phi_{sat_b}| \\ P_{V_b} = 1 & \text{se } \phi_v > |\phi_{sat_b}| \\ P_{V_b} = -1 & \text{se } \phi_v < -|\phi_{sat_b}| \end{cases} \quad (4.47)$$

Para a condução no simulador em curvas leves e em curvas apertadas, o valor do ganho derivado  $K_d$  (tabela 4.16) do controlador PID é de 0,01, sendo o valor do coeficiente <sup>17</sup>  $N_{PID}$  de 100. O ganho integral  $K_i$  foi obtido de forma a assegurar um ângulo máximo de viragem de  $30^\circ$ . Após a sintonia do controlador PI, o ganho derivado  $K_d$  é escolhido de forma a aumentar a largura de banda para uma sobre-elevação predefinida.

<sup>17</sup> Do Filtro Passa-Baixo de *anti-aliasing* utilizado para implementar o controlador  $C_{PID}(z)$  de (4.45).

Tendo em conta que se recorre a um controlador de comutação não linear, um maior número de estados de condução poderá levar a instabilidade em anel fechado, se um tempo de aceitação ou residência <sup>18</sup> não for garantido. Por este motivo a utilização do menor número de estados evitará demasiada comutação do controlador de assistência.

Tabela 4.16: Ajuste do ganho integral  $K_i$  e do ganho derivado  $K_d$  com base na saturação do volante  $\phi_{sat_b}$ .

	Retas (agrupamento 1)	Curvas leves (agrupamento 2)	Curvas apertadas (agrupamento 3)
Sem controlador	$\phi_{sat_b} = \pm 120^\circ$	$\phi_{sat_b} = \pm 120^\circ$	$\phi_{sat_b} = \pm 120^\circ$
Com controlador	$\phi_{sat_b} = \pm 60^\circ; K_i = 0; K_d = 0$	$\phi_{sat_b} = \pm 50^\circ; K_i = 1; K_d = 0,01$	$\phi_{sat_b} = \pm 30^\circ; K_i = 1; K_d = 0,01$

A arquitetura de controlo do sistema de assistência é apresentada na figura 4.76, considerando um período de amostragem  $T_s$  de 10 ms.

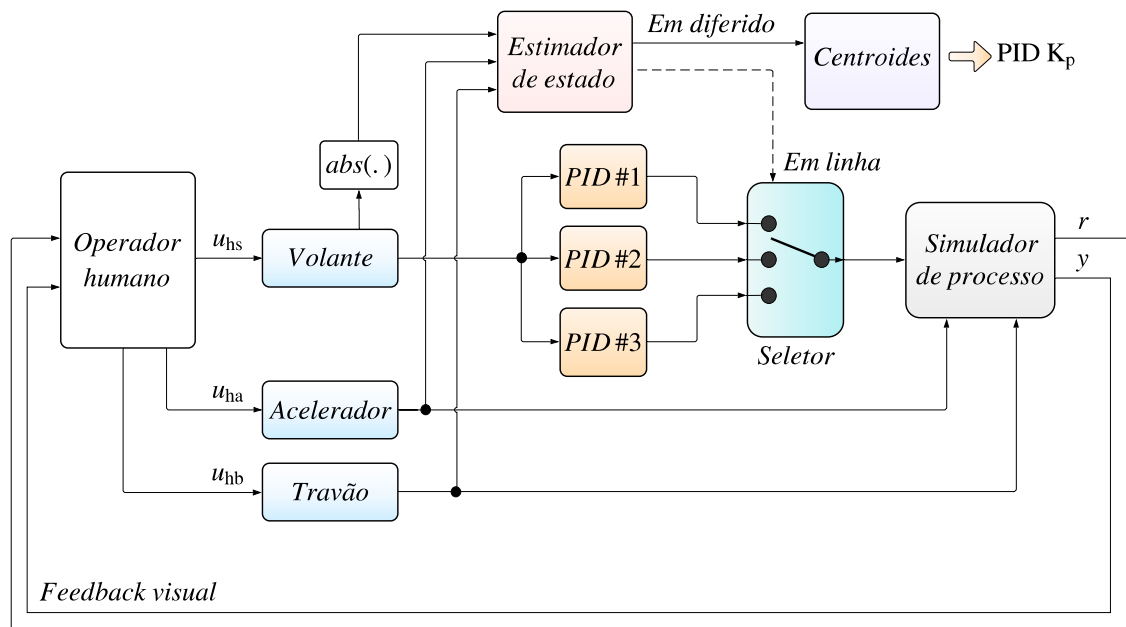


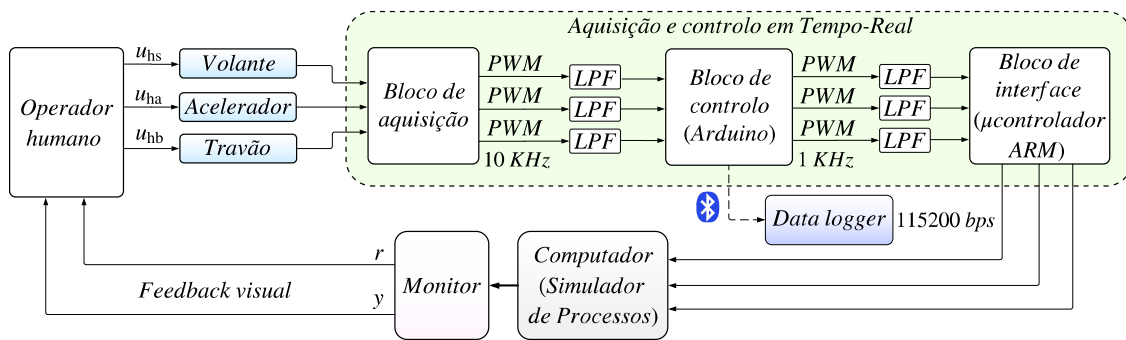
Figura 4.76: Arquitetura do controlador de assistência baseado em transferência de conhecimento, para tarefas de condução num simulador de Fórmula 1.

### 4.5.3 Implementação em *hardware* do sistema de apoio ao condutor

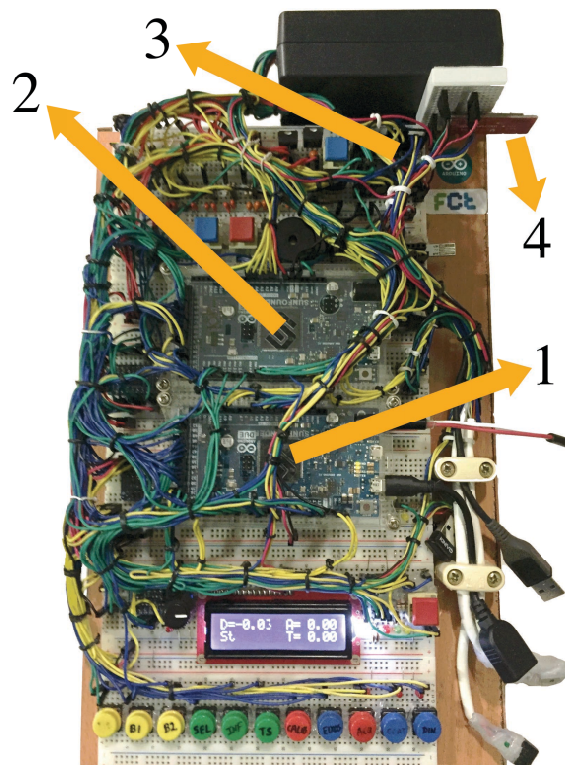
O *hardware* desenvolvido de assistência ao condutor (figuras 4.77 e 4.78) é suportado em três elementos principais: o bloco de aquisição, o bloco de controlo e o bloco da interface de simulação. Cada um destes blocos possui um microcontrolador ARM® Cortex® de 32 *bits*. No bloco de aquisição os Conversores Analógicos-Digitais (ADCs) de 10 *bits* do microcontrolador SAM3X8E (Atmel®-Microchip®) da placa ARDUINO® Due convertem os dados adquiridos do volante e dos pedais do acelerador e do travão. Os dados da Interface Humano-Máquina enviados para o bloco de controlo podem ser visualizados no *Display* de Cristal Líquido (LCD) (figura 4.78).

<sup>18</sup> Também designado na terminologia anglo-saxónica por *dwell time*.



Figura 4.77: Arquitetura de *hardware*.

A implementação dos controladores de assistência é realizada recorrendo ao projeto baseado em modelos Simulink®, descrito no capítulo 3 (subsecção 3.4.6.1), sendo que os algoritmos de controlo de Tempo-Real foram implementados com base em modelos Simulink®, desenvolvidos de acordo com a arquitetura da figura 4.76. O sistema de aquisição de dados possui dois modelos de comunicação específicos: a comunicação tradicional através de cabo USB e a comunicação sem fios. O modo de aquisição sem fios é implementado utilizando um módulo de comunicação por *Bluetooth*® RN-42 da Roving Networks (Microchip®), configurado para o Perfil de Porta Série (SPP).

Figura 4.78: *Hardware* para aquisição em Tempo-Real e controlo (última versão, com sistema de aquisição de dados sem fios): 1-bloco de aquisição; 2-bloco de controlo; 3-bloco da interface; 4-módulo *Bluetooth*® (BT).




#### 4.5.4 Análise dos resultados experimentais

Os dez condutores participaram nas experiências sob as condições seguintes: a) condução sem nenhum controlador de assistência; b) condução com o controlador PID de comutação baseado em transferência de conhecimento do condutor de referência B; c) condução com o controlador PID de comutação baseado em transferência de conhecimento do condutor de referência A.

Todas as experiências no simulador de condução de Fórmula 1, que forneceram cerca de 520 MB de dados recolhidos foram realizadas para a mesma pista e para o mesmo carro de corrida, dotado de transmissão automática. Os resultados experimentais tendo em conta a média  $\mu(T_L)$  e o desvio padrão  $\sigma(T_L)$  da duração das voltas de todos os condutores humanos, sem controlador e com os controladores B e A, são apresentados na tabela 4.17. Os melhores resultados são mostrados a cor verde. A pista virtual de Fórmula 1 utilizada nas experiências é a do Grande Prémio da Austrália (*Albert Park*), tendo o recorde mundial de 84,13 s sido estabelecido em 2004 por Michael Schumacher, com um carro de corrida com transmissão manual. A melhor volta nas experiências com o simulador de condução com transmissão automática, considerada como a volta ideal  $T_{ID}$ , foi de 89,30 s, sendo realizada pelo condutor H com o controlador de assistência A.

As medidas de esforço consideradas nas experiências, cujos valores se apresentam na tabela 4.18, são a média e o desvio padrão do valor absoluto  $M_{VTA}$  de todos os movimentos da Interface Humano-Máquina (relativos à posição do volante, à travagem e à aceleração), divididos pela duração da volta:  $M_{LA} = \mu(M_{VTA}/T_L)$ ;  $S_{LA} = \sigma(M_{VTA}/T_L)$ , e a média e o desvio padrão da posição absoluta do volante:  $\mu(PA_V)$ ;  $\sigma(PA_V)$ , relacionados com a força de deformação respetiva.

Tabela 4.17: Média e desvio padrão dos tempos das voltas para todos os condutores, sem controlador e com os controladores B e A.

	Sem controlador		Com controlador B		Com controlador A	
	$\mu(T_L)$ (s)	$\sigma(T_L)$ (s)	$\mu(T_L)$ (s)	$\sigma(T_L)$ (s)	$\mu(T_L)$ (s)	$\sigma(T_L)$ (s)
Condutor A	104,36	4,68	99,81	4,43	97,08	3,15
Condutor B	109,82	4,57	108,15	1,93	102,95	2,26
Condutor C	111,97	5,78	113,82	4,27	108,45	4,69
Condutor D	110,48	4,41	105,33	3,20	103,05	3,95
Condutor E	119,68	8,79	119,51	5,18	124,13	3,52
Condutor F	142,73	11,02	151,62	11,22	161,40	24,85
Condutor G	123,77	6,16	119,37	8,73	115,59	3,35
Condutor H	96,21	5,20	94,12	4,25	92,46	3,54
Condutor I	110,47	5,49	109,94	4,72	104,56	5,69
Condutor J	94,45	3,16	94,06	1,89	93,65	1,95

O índice de desempenho  $I_{PC}$  para a quantificação da proficiência dos condutores é proposto em (4.48), tendo em conta  $T_{ID} = 89,30$  s e com os coeficientes de desempenho:  $\alpha_L = 0,5$ ;  $\beta_L = 0,1$ ;  $\gamma_L = 0,2$ ;  $\delta_V = 0,2$ . Uma avaliação básica do impacto destes fatores, satisfazendo a condição  $\alpha_L + \beta_L + \gamma_L + \delta_V = 1,0$  é apresentada na tabela 4.19.

$$I_{PC} = \frac{100}{\alpha_L (\mu(T_L) - T_{ID}) + \beta_L \sigma(T_L) + \gamma_L \mu\left(\frac{M_{VTA}}{T_L}\right) + \delta_V \mu(PA_V)} \quad (4.48)$$

A média e o desvio padrão do esforço dos condutores, com a inclusão ou não dos controladores de comutação de assistência, baseados em transferência de aprendizagem/conhecimento, é apresentada na tabela 4.18. Os valores calculados do índice de desempenho  $I_{PC}$  para todos os participantes humanos (condutores A a J), sem controlador e com os controladores B e A, são mostrados na tabela 4.20, tendo em conta idênticas condições nas experiências realizadas no simulador, sendo que os maiores valores de  $I_{PC}$  correspondem aos melhores desempenhos.

Tabela 4.18: Resultados do esforço para os condutores humanos A a J, obtidos a partir das experiências realizadas no simulador de condução.

	Sem controlador		Com controlador B		Com controlador A	
	$M_{LA} (s^{-1})$	$S_{LA} (s^{-1})$	$M_{LA} (s^{-1})$	$S_{LA} (s^{-1})$	$M_{LA} (s^{-1})$	$S_{LA} (s^{-1})$
Condutor A	1,23	0,06	1,25	0,07	1,35	0,07
Condutor B	1,33	0,12	1,20	0,08	1,32	0,08
Condutor C	1,45	0,05	1,48	0,04	1,54	0,05
Condutor D	1,49	0,03	1,59	0,07	1,61	0,04
Condutor E	1,48	0,05	1,66	0,05	1,58	0,07
Condutor F	1,54	0,09	1,73	0,06	1,69	0,06
Condutor G	1,46	0,03	1,44	0,04	1,37	0,04
Condutor H	1,54	0,07	1,67	0,05	1,58	0,06
Condutor I	1,50	0,04	1,45	0,03	1,48	0,03
Condutor J	1,52	0,03	1,52	0,07	1,48	0,04

	Sem controlador		Com controlador B		Com controlador A	
	$\mu(PA_V)$	$\sigma(PA_V)$	$\mu(PA_V)$	$\sigma(PA_V)$	$\mu(PA_V)$	$\sigma(PA_V)$
Condutor A	0,45	0,02	0,44	0,02	0,43	0,02
Condutor B	0,39	0,02	0,37	0,02	0,37	0,02
Condutor C	0,38	0,03	0,39	0,03	0,40	0,02
Condutor D	0,35	0,02	0,37	0,02	0,37	0,02
Condutor E	0,36	0,03	0,33	0,02	0,32	0,02
Condutor F	0,36	0,07	0,43	0,06	0,41	0,09
Condutor G	0,36	0,03	0,36	0,03	0,35	0,04
Condutor H	0,42	0,02	0,43	0,01	0,44	0,01
Condutor I	0,37	0,02	0,36	0,02	0,37	0,02
Condutor J	0,39	0,01	0,39	0,01	0,39	0,01

Tabela 4.19: Índice de desempenho  $I_{PC}$  versus  $\alpha_L$ ,  $\beta_L$ ,  $\gamma_L$  e  $\delta_V$ , para o condutor humano A com o controlador de assistência A.

Condutor A com o controlador de assistência A				
$\alpha_L$	$\beta_L$	$\gamma_L$	$\delta_V$	$I_{PC}$
0,20	0,20	0,30	0,30	36,76
0,35	0,15	0,25	0,25	27,47
0,50	0,10	0,20	0,20	21,93
0,65	0,05	0,15	0,15	18,24
0,80	0,00	0,10	0,10	15,62

Tabela 4.20: Índice de desempenho  $I_{PC}$  para todos os condutores.

	Sem controlador	Com controlador B	Com controlador A
	$I_{PC}$		
Condutor A	12,00	16,57	21,93
Condutor B	9,04	10,07	13,53
Condutor C	8,14	7,66	9,59
Condutor D	8,77	11,46	13,04
Condutor E	6,08	6,24	5,51
Condutor F	3,55	3,06	2,57
Condutor G	5,49	6,15	7,23
Condutor H	22,90	30,72	42,77
Condutor I	8,69	8,97	11,67
Condutor J	30,55	33,89	36,44

Os resultados das tabelas 4.17, 4.18 e 4.20 confirmam que, sem nenhum controlador, o desempenho médio dos condutores que satisfazem a condição de transferência de aprendizagem é menor do que o desempenho médio com a utilização de um dos controladores de assistência. Sem controlador, o valor médio do desvio padrão  $\sigma(T_L)$  da duração das voltas dos nove condutores que garantem a condição de transferência de aprendizagem é também superior, conforme se pode constatar dos dados da tabela 4.17.

O controlador de assistência obtido a partir do modelo FCM de aprendizagem do condutor de referência A possibilita uma melhoria média de desempenho de 44,82 % para os operadores que satisfazem a condição de transferência de aprendizagem (condutores A, B, C, D, E, G, H, I e J), confirmando-se assim a transferência de conhecimento. O valor médio dos índices de desempenho obtidos a partir do modelo de aprendizagem FCM do condutor B (não especialista), excluindo o condutor F (não correlacionado), apresenta também uma melhoria de 17,97 %, quando comparado com a média dos nove índices de desempenho sem controlador. Os dados obtidos revelam ainda que a perícia dos condutores A e B de referência melhora, quando são utilizados os controladores de assistência baseados nos seus próprios dados.

De forma a verificar se os dados adquiridos das interfaces volante, acelerador e travão estão conforme uma distribuição normal, são obtidos gráficos de probabilidade normal *rankit*, utilizando a função MATLAB® *normplot()*. Se os dados de condução estão de acordo com uma distribuição normal, o gráfico *rankit* correspondente irá aparentar um aspeto linear. Outras funções de densidade de probabilidade irão introduzir uma curvatura no gráfico. Estes gráficos são apresentados de forma a mostrar os desvios dos padrões de condução para os condutores com desempenhos distintos.

As figuras 4.79 e 4.80 ilustram os gráficos de probabilidade normal *rankit* dos dados das interfaces volante, acelerador e travão, para os participantes E e J, com diferentes desempenhos, tomando como exemplos um condutor não especialista (condutor E) e um condutor especialista (condutor J). Destas figuras é possível distinguir diferentes comportamentos dinâmicos de condução, principalmente através da observação dos perfis associados à posição do volante e do acelerador.

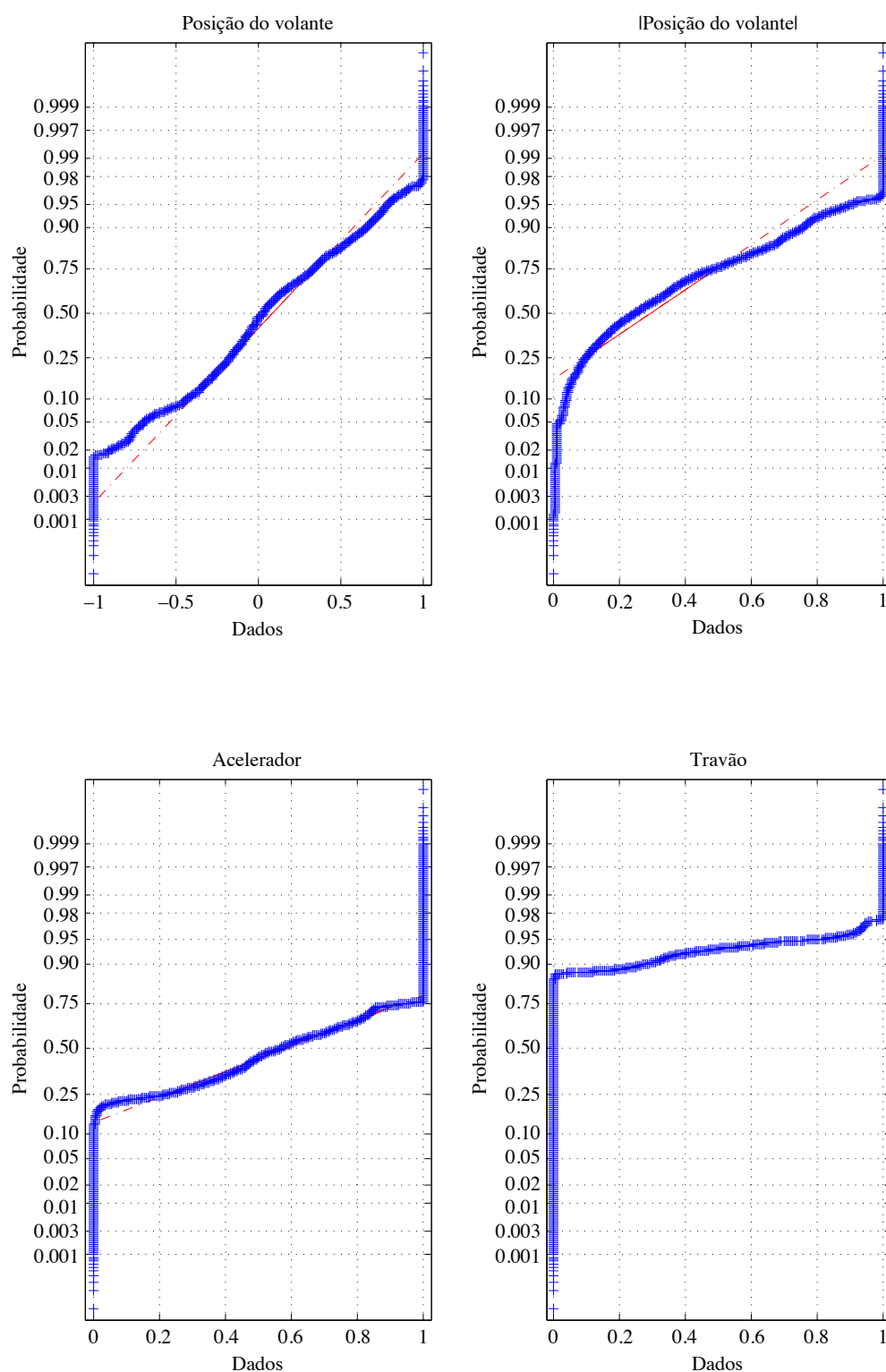


Figura 4.79: Gráfico de probabilidade normal (*rankit*) para os dados de condução relativos ao condutor humano E.

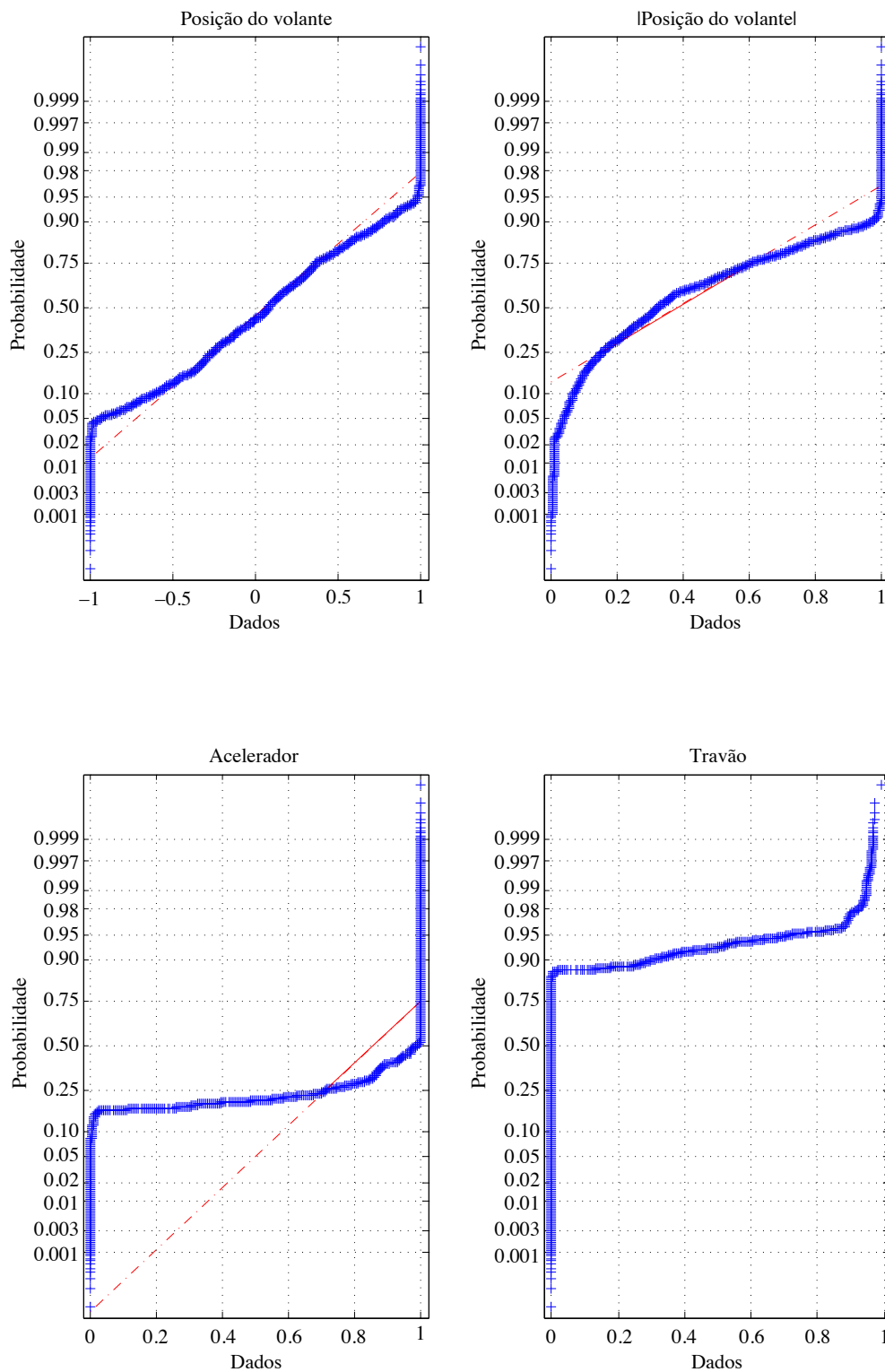


Figura 4.80: Gráfico de probabilidade normal (*rankit*) para os dados de condução relativos ao condutor humano J.

Como era esperado, os dados experimentais acerca da dinâmica do travão não se adequam a uma distribuição normal para nenhum dos condutores. Relativamente ao comportamento dinâmico

associado à posição do volante, a função de densidade de probabilidade, próxima dos limites dos dados, assume valores mais elevados para o condutor especialista J, quando comparada com o condutor não especialista E.

Na figura 4.80, os dados da aceleração para o condutor especialista J apresentam um desvio em relação à linha de normalidade <sup>19</sup> em toda a gama de dados, em contraste com os dados obtidos relativos à aceleração do condutor não especialista E (figura 4.79), que se adequam a uma distribuição normal, exceto nas regiões próximas dos limites dos dados. Podem ainda ser utilizados outros testes de normalidade, como por exemplo o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov e o teste de D'Agostino-Pearson (Razali et al., 2012).

#### 4.5.5 Considerações sobre a transferência de aprendizagem

Os testes experimentais realizados tiveram por objetivo provar que o controlador PID, sintonizado através da abordagem proposta, permite a implementação da transferência de aprendizagem/conhecimento entre operadores especialistas e não especialistas, em sistemas com o Humano Integrado no Anel de controlo. São propostas novas ideias para as Interfaces Humano-Máquina, onde a informação disponível se encontra essencialmente dependente da observação humana, sendo descrita uma metodologia original para modelar e permitir melhorar o comportamento do operador, a partir de uma estratégia de classificação difusa e de controlo PID que utiliza os dados em Tempo-Real e a informação adicional recolhida através da melhor volta realizada por um condutor de referência.

É validada uma condição para transferência de aprendizagem/conhecimento, baseada na análise de correlação. A flexibilidade do algoritmo FCM permite também, agrupamentos graduais dos dados recolhidos para mais do que apenas um agrupamento. Uma estratégia para estimar o número de agrupamentos e os seus valores iniciais poderá também ser considerada para a inicialização do algoritmo FCM.

Foi desenvolvido, implementado e testado um Controlador Proporcional, Integral e Derivado (PID) de comutação em Tempo-Real implementado em *hardware*, que se baseia numa técnica de agrupamento difusa e numa estratégia de controlo não linear rápido, de forma a melhorar a perícia do operador, recorrendo à utilização de microcontroladores ARM® Cortex® de 32 *bits*. Outros métodos de sintonia PID, podem ser utilizados, tais como as técnicas de otimização inspiradas na natureza. De acordo com a tabela 4.20, 80 % dos utilizadores melhoram o desempenho com o controlador de assistência A.

A abordagem de assistência adotada entre operadores levou ao aumento significativo do desempenho de condução dos condutores humanos que satisfazem a condição de transferência de aprendizagem/conhecimento, com uma melhoria média de 44,82 %, quando utilizado o controlador de assistência A. A normalidade dos dados do comportamento dinâmico de condução foi também analisada.

---

<sup>19</sup> Assinalada no gráfico correspondente a vermelho e a traço e ponto.

## 4.6 Projeto de sistemas de controlo para tecnologia assistiva

As implicações para o desenvolvimento e a utilização de sistemas automáticos de adaptação humano-máquina são promissoras, já que possibilitam, normalmente, um aumento do desempenho e da usabilidade. A necessidade da criação de equipamentos ligados à Saúde recorrendo, por exemplo, às tecnologias vestíveis, aos dispositivos humanos implantáveis, à TeleSaúde e à tecnologia assistiva (Oishi et al., 2010), originou esforços relevantes de investigação pela comunidade científica, mencionados no capítulo 2. Os dispositivos não intrusivos de Interface Humano-Computador podem por exemplo ser projetados através de Unidades de Medição Inercial (IMUs) (Kok et al., 2014), de sensores de deteção facial (Chen et al., 2018) e de movimento no Espaço Tridimensional (Vydhyathan & Bellusci, 2018), de sensores mioelétricos e de sensores EEG (Chu, 2018; Kaongoen & Jo, 2018; Kim et al., 2018), entre outros.

### 4.6.1 Visão computacional

Pretendeu desenvolver-se um sistema de assistência ao operador, baseado em visão computacional para a melhoria da usabilidade e do desempenho em aplicações de acesso ao computador, envolvendo tarefas Ponto-a-Ponto (PTP) e tarefas com teclados virtuais, de modo a possibilitar a utilização de Sistemas Operativos (OSs) em mãos livres, sendo projetada uma interface de assistência para melhorar a perícia humana na utilização do computador sem intervenção manual. O sistema humano-máquina de apoio concebido é baseado numa estratégia de controlo que toma em conta a posição atual do cursor e a “intenção” visual do alvo (assinalada na figura 4.81 a vermelho), capturada a partir de uma *webcam* de baixo custo, com recurso à técnica de reconhecimento facial de Viola-Jones (Viola & Jones, 2001).

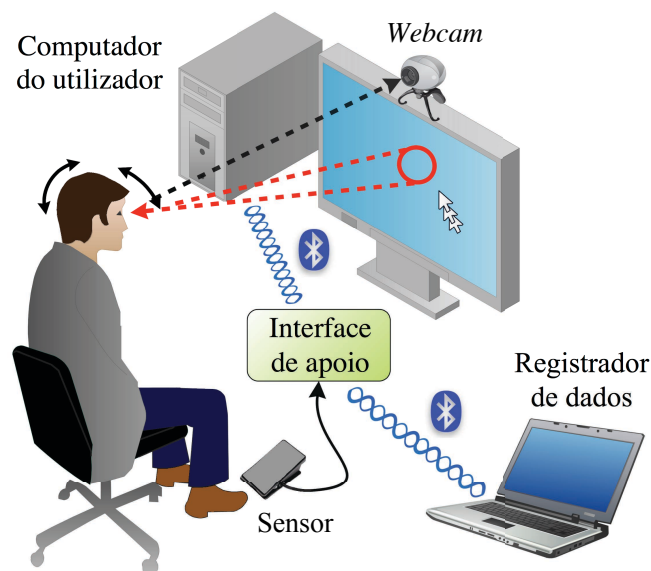


Figura 4.81: Ilustração conceptual do sistema de assistência com Interação Facial Humano-Computador (FHCI).

A interface sem fios desenvolvida, permite a substituição de um Dispositivo de Interface Humana (HID) tradicional, tal como o rato, o teclado ou o *gamepad/joystick*, possibilitando ainda o registo em ficheiro dos dados adquiridos como a posição do cursor do computador, o estado dos botões e as coordenadas da “intenção” da nova posição alvo para o cursor.

#### 4.6.1.1 Arquitetura de controlo do sistema de interação facial

Foi concebida uma aplicação de rastreamento facial em Tempo-Real (figura 4.82) na linguagem de programação visual Processing (Reas et al., 2007), tendo sido implementada a metodologia de deteção facial de Viola-Jones, através da utilização da Biblioteca de *Software* Livre de Visão Computacional (OpenCV).

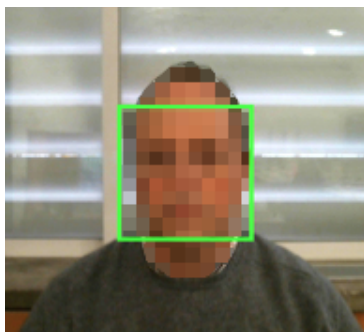


Figura 4.82: Rastreamento facial em Tempo-Real, utilizando uma *webcam*, a Biblioteca de *Software* Livre de Visão Computacional (OpenCV) e a linguagem de programação Processing <sup>20</sup>.

A arquitetura proposta do sistema de Interação Facial Humano-Computador (FHCI) é ilustrada na figura 4.83. O utilizador observa a posição atual do cursor no monitor do computador, movendo a cabeça em direção à localização do novo alvo a atingir, denominado de alvo de “intenção” humana, que irá corresponder à posição final aproximada do cursor do computador.

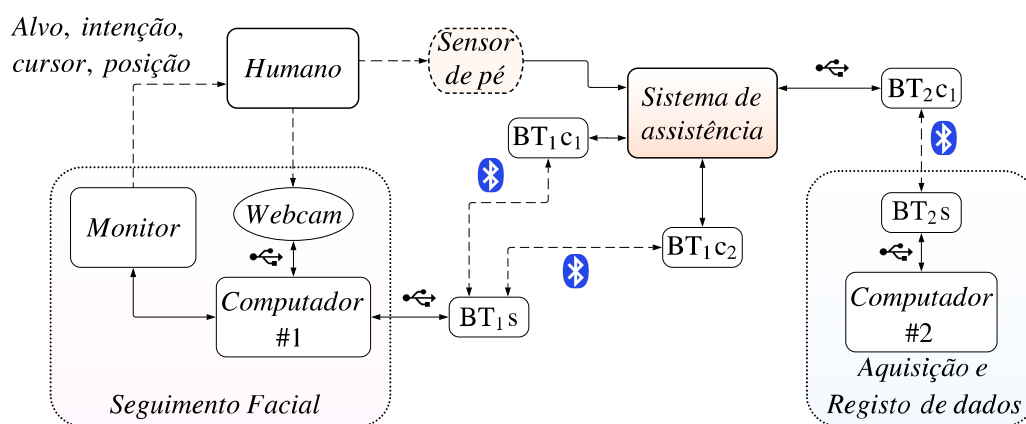


Figura 4.83: Arquitetura FHCI proposta.

<sup>20</sup> <https://www.processing.org/>.



Alguns sensores especiais como os sensores capacitivos, os *sip-and-puff* e os sensores de contacto mecânico para o pé, através de pedal, podem ser ligados ao *hardware*, de modo a poder replicar as ações associadas aos botões do rato, de um teclado ou de um manípulo. Para a realização dos testes do sistema de assistência foi escolhido um sensor de contacto mecânico através de pedal, denominado de sensor de pé (figura 4.83).

A aplicação desenvolvida é executada em ecrã completo, num monitor com resolução de  $1920 \times 1080$  pixels. A posição atual do cursor e a informação da “intenção” do utilizador são ambas enviadas do computador do utilizador, via *Bluetooth*<sup>®</sup> (BT<sub>1s</sub> – BT<sub>1c1</sub>) para a interface desenvolvida. O sistema de assistência, dotado de um controlador PID, permite ainda o envio, através de *Bluetooth*<sup>®</sup>, da posição atual do cursor do computador (BT<sub>1s</sub> – BT<sub>1c2</sub>). Um segundo computador (figura 4.83) é utilizado para efeitos de aquisição e registo dos dados (BT<sub>2s</sub> – BT<sub>2c1</sub>).

A interface construída utiliza microcontroladores ARM<sup>®</sup> de 32 bits, devido ao seu compromisso de velocidade-custo. A interface de assistência desenvolvida está dividida em três blocos principais: o bloco de aquisição, o bloco de controlo e o bloco de interface com o computador, sendo cada um destes constituído por microcontroladores ARM<sup>®</sup> Cortex<sup>®</sup> de 32 bits, funcionando à velocidade de 84 MHz e de 96 MHz. O bloco de aquisição lê através de *Bluetooth*<sup>®</sup> a posição atual do cursor do computador e a “intenção” (humana) da posição de destino do cursor, capturada através da *webcam*, do computador do utilizador e da aplicação de rastreamento facial. Estes dados são normalizados e enviados para o bloco do controlador, o qual irá executar o algoritmo de controlo PID com *anti-windup*, a uma frequência de amostragem de 100 Hz.

O bloco de interface *Bluetooth*<sup>®</sup> (BT<sub>1</sub>) com o computador (figuras 4.83 e 4.85) é implementado, tomando em conta os valores das saídas de controlo para os eixos X e Y, referentes à velocidade do cursor do computador. A comunicação HID sem fios que permite a movimentação do cursor no ecrã utiliza o módulo SMD RN-42 da Roving Networks (Microchip<sup>®</sup>) (figura 4.1). Este módulo pode ser ainda configurado para o Perfil de Porta Série (SPP), possibilitando a comunicação série sem fios.

A estratégia de controlo humano-máquina adotada é baseada num esquema de controlo em cascata (Levine, 2010), no qual os blocos *Hu* e *Mo* (figura 4.84) se encontram respetivamente relacionados com o rastreamento facial e com o *hardware* da Interface Humano-Máquina. A estrutura de controlo possui um anel interno de controlo, implementado com um controlador PID, e um anel externo de controlo, no qual o operador humano é o controlador. Nas tarefas de acesso ao computador em avaliação, o principal objetivo de controlo é garantir que a posição do cursor do computador  $p_{x,y}(k)$  segue a posição do alvo  $t_{x,y}(k)$  para cada amostra  $k$ , com um erro mínimo e tão rapidamente quando possível.

Na figura 4.84, o sinal de comutação  $\sigma_c(t)$  permite a operação com ou sem o controlador de assistência. O anel de controlo interno deve ser utilizado, dado que o sinal da “intenção”  $n_{x,y}(k)$  apresenta normalmente maior variância em operações em ecrã completo, devido à qualidade de algumas *webcams*, ao tempo de execução da técnica de deteção facial e aos erros de quantização na conversão analógico-digital dos sinais. O sinal de comutação  $\delta_c(t)$  possibilita ao utilizador humano a visualização da “intenção” do cursor (círculo a vermelho da figura 4.86), sendo utilizado para a obtenção de um modelo do comportamento humano.

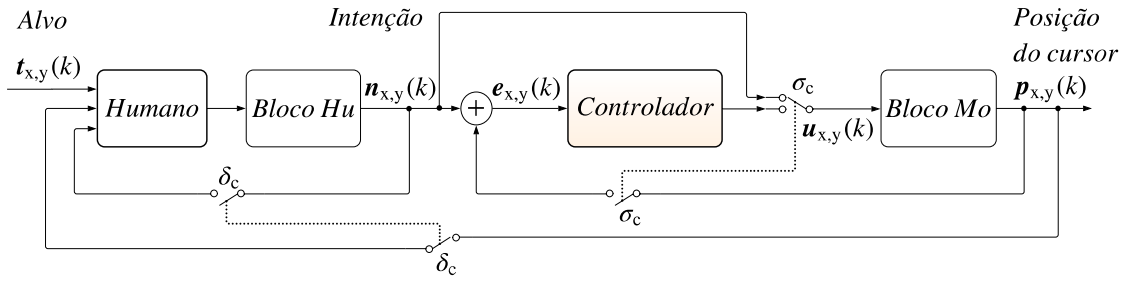


Figura 4.84: Diagrama de blocos do sistema de assistência FHCI.

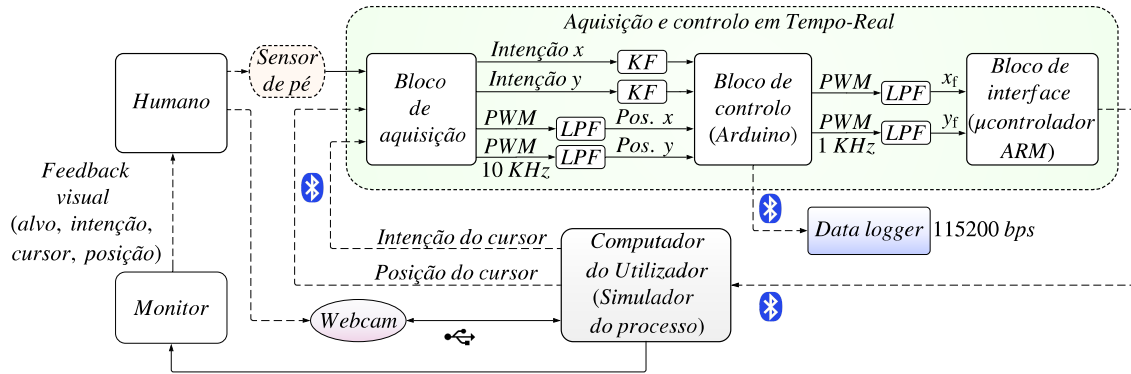
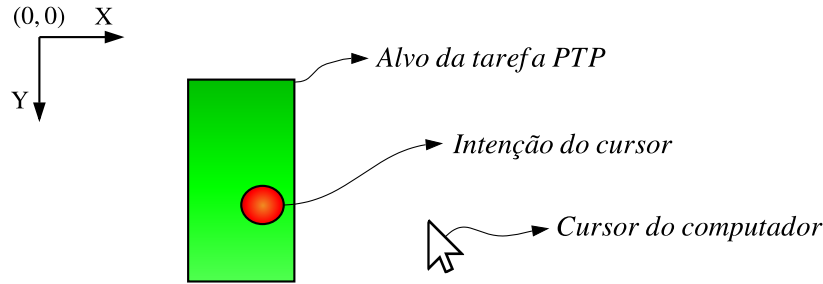
Figura 4.85: Diagrama do *hardware* do sistema de assistência humano-computador com base em Visão Computacional.

Figura 4.86: Ilustração conceitual de uma experiência PTP.

Tomando como referência o modelo de segunda ordem de Tustin-McRuer (4.49) é implementada para as experiências aleatórias PTP uma estrutura baseada num Modelo Auto-Regressivo com Entradas Exógenas (ARX) ( $na = 2$ ,  $nb = 2$  e  $nd = 1$ ), com o objetivo de caracterizar de forma simplificada o comportamento do operador humano. Estes modelos matemáticos são necessários para projetar e sintonizar um controlador PID baseado em técnicas de *root-locus* e de colocação de polos.

$$H(s) = K_H \frac{T_L s + 1}{(T_N s + 1)(T_I s + 1)} e^{-\tau s} \quad (4.49)$$

A implementação em tempo discreto da estrutura do controlador PID (4.50) com termo de *anti-windup* é realizada, assumindo o método de discretização de Tustin (Åström & Hägglund, 1988).

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.50)$$

Para a avaliação do desempenho do operador no sistema de assistência é proposta a função incremental de custo  $J_c(k, n_{\text{tar}})$  descrita no capítulo 3 (subsecção 3.5.3), definida por

$$J_c(k, n_{\text{tar}}) = \frac{\text{MSE}_x(k) + \text{MSE}_y(k)}{\beta_F x_{\text{max}} y_{\text{max}} n_{\text{tar}} T_{\text{PTP}}} \psi(n_{\text{tar}}) \quad (4.51)$$

com

$$\text{MSE}_x(k) = \frac{\sum_{v=k-w_d+1}^k (E_x(v))^2}{w_d} \quad (4.52)$$

$$\text{MSE}_y(k) = \frac{\sum_{v=k-w_d+1}^k (E_y(v))^2}{w_d} \quad (4.53)$$

$$E_x(k) = T_x(k) - P_x(k) \quad (4.54)$$

$$E_y(k) = T_y(k) - P_y(k) \quad (4.55)$$

e

$$\psi(n_{\text{tar}}) = 1 + \gamma_F \log_2 \left( \alpha_F + \sqrt{\frac{M(n_{\text{tar}})}{n_{\text{tar}}}} \right) \quad (4.56)$$

sendo  $T_{\text{PTP}}$  a duração em segundos da posição (aleatória) de cada alvo PTP,  $N_{\text{PTP}}$  o número total de tarefas,  $n_{\text{tar}}$  o número da tarefa Ponto-a-Ponto em execução e  $k$  a amostra atual.  $M(n_{\text{tar}})$  é o número acumulado de alvos não atingidos durante a experiência de seguimento PTP, sendo  $\alpha_F$ ,  $\beta_F$  e  $\gamma_F$  parâmetros reais de projeto, tendo em conta uma resolução do ecrã de  $x_{\text{max}} \times y_{\text{max}}$  pixels (px).  $E_x(k)$  e  $E_y(k)$  são os erros de controlo nos eixos X e Y e  $\text{MSE}_x(k)$  e  $\text{MSE}_y(k)$  correspondem aos erros quadráticos médios para uma janela deslizante de tamanho  $w_d$  (neste caso de 80 amostras), considerando o período de amostragem de 62,5 ms do método de rastreamento facial. O termo  $\psi(n_{\text{tar}})$  de (4.56) está relacionado com a taxa de sucesso de alcance Ponto-a-Ponto à sequência de alvos aleatórios que, consecutivamente, vão surgindo no ecrã.

#### 4.6.1.2 Implementação do controlador para o sistema FHCI

Para a implementação do bloco do controlador (figura 4.85) do sistema FHCI na plataforma ARDUINO® Due, recorre-se à metodologia de projeto baseado em modelos Simulink® (Antunes et al., 2015; Antunes et al., 2016), descrita no capítulo 3 (subsubsecção 3.4.6.1). No bloco do controlador é ainda implementado um Filtro de Kalman (KF) (Levine, 2010) com covariância do ruído

associado ao processo  $Q_n = 1 \times 10^{-4}$ , covariância do ruído associado à medida  $R_n = 2,23 \times 10^{-4}$  e com  $A = [1]$ ,  $B = [0]$ ,  $C = [1]$  e  $u = 0$ . Os sinais das saídas PWM <sup>21</sup> filtradas do bloco do controlador correspondem às entradas analógicas do bloco de interface (figura 4.85). Os parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  do controlador PID de tempo discreto (Åström & Hägglund, 1988) foram ajustados para respetivamente: 0,20; 2,00 s e 0,05 s, recorrendo às metodologias de *root-locus* e de colocação de polos, com o coeficiente  $N_{PID} = 10$  do filtro e a constante de tempo de *anti-windup*  $T_t = 1,00$  s.

#### 4.6.1.3 Validação do sistema de assistência de interação facial

Dois tipos de experiências de acesso ao computador sem intervenção dos membros superiores são realizadas por dez participantes humanos, tendo uma média de idades de 30,8 anos e um desvio padrão de 14,9 anos. Estas experiências realizadas numa interface de mãos livres, sem e com controlador, envolvem tarefas Ponto-a-Ponto (PTP) (figura 4.87) e tarefas em teclado virtual (figura 4.90). O objetivo das experiências PTP é que o utilizador tente seguir um alvo (representado pelo retângulo a verde da figura 4.86), observando ao mesmo tempo a posição atual do cursor do computador (seta a branco da figura 4.86), ou, na fase de modelização, observando também a “intenção” do utilizador (representada na figura 4.86 pelo círculo a vermelho). O número de tarefas sequenciais PTP consideradas é de 30 ( $N_{PTP} = 30$ ), sendo que cada alvo aleatório se mantém fixo durante aproximadamente 10 segundos ( $T_{PTP} = 10$  s). As coordenadas da origem encontram-se localizadas no canto superior esquerdo do ecrã do computador.



Figura 4.87: Interface de assistência desenvolvida, utilizada para as experiências Ponto-a-Ponto, com uma *webcam*.

A melhoria do desempenho foi conseguida com os parâmetros do controlador ajustados para modelos de segunda ordem. A estrutura ARX para cada eixo, com  $na = 2$ ,  $nb = 2$  e  $nd = 1$  é obtida, com um valor do critério de melhor ajuste próximo de 62 %. Na figura 4.88 são apresentados, como exemplos, os resultados relativos aos erros quadráticos médios de controlo  $MSE_X$  e  $MSE_Y$ , respetivamente para os eixos X e Y, assim como o índice de desempenho  $P_{in}$  que corresponde ao

<sup>21</sup> Modulador de Largura de Impulso.

integral da função de custo  $J_c(k, n_{tar})$  de (4.51) e (4.56), para os dados adquiridos (com:  $\alpha_F = 1,1$ ;  $\beta_F = 1,0$ ;  $\gamma_F = 0,0$ ), sendo que a um índice  $P_{in}$  menor corresponderá um melhor desempenho.

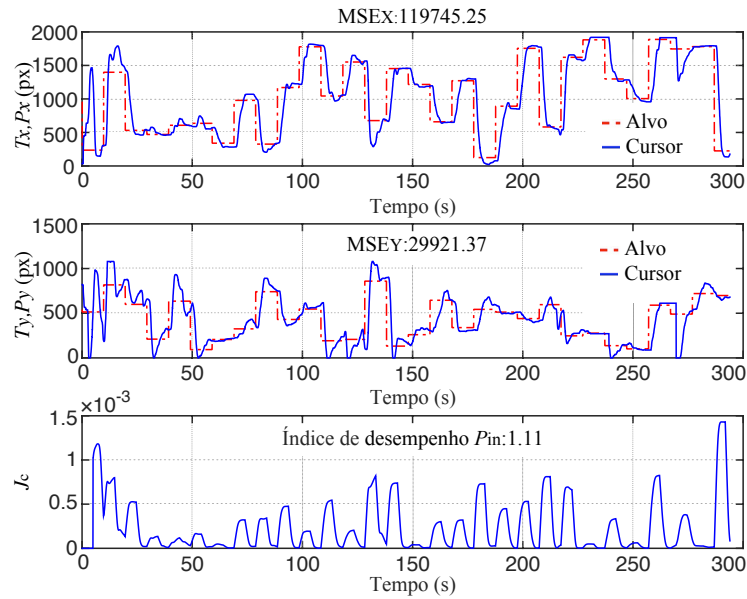


Figura 4.88: Resultados experimentais dos erros quadráticos médios  $MSE_X$  e  $MSE_Y$  e do índice de desempenho  $P_{in}$  para o utilizador A, sem controlador.

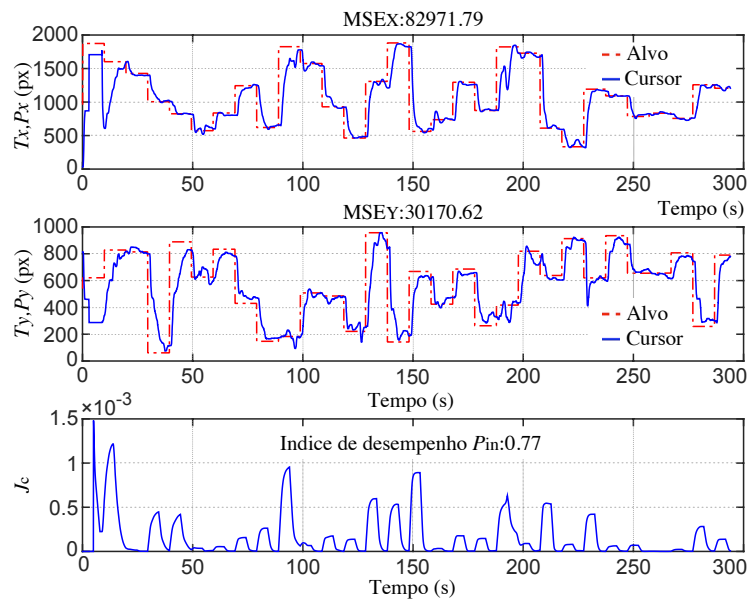


Figura 4.89: Resultados experimentais dos erros quadráticos médios  $MSE_X$  e  $MSE_Y$  e do índice de desempenho  $P_{in}$  para o utilizador A, com o controlador de assistência.

As figuras 4.88 e 4.89 mostram os resultados relativos aos erros quadráticos médios  $MSE_X$  e  $MSE_Y$  e ao índice de desempenho  $P_{in}$  para o utilizador A, respetivamente sem e com o controlador PID. Os eixos verticais nos dois primeiros gráficos (figuras 4.88 e 4.89) indicam as coordenadas do ecrã, em *pixels*. Os valores dos erros quadráticos médios e do índice de desempenho  $P_{in}$  para todos os participantes (A a J) são apresentados na tabela 4.21. Os resultados da tabela 4.21 e das figuras

4.88 e 4.89, revelam que a arquitetura de controlo proposta propicia a melhoria do desempenho e da usabilidade, dado que o índice médio de desempenho  $P_{in}$  diminui de 1,39 para 0,93.

Tabela 4.21: Resultados das experiências PTP.

Sem controlador	MSE <sub>X</sub>	MSE <sub>Y</sub>	$P_{in}$
Participante A	119 745,25	29 921,37	1,11
Participante B	116 164,74	40 433,40	1,16
Participante C	209 304,54	37 487,38	1,81
Participante D	100 231,91	37 170,19	0,95
Participante E	168 503,09	121 990,13	2,15
Participante F	135 381,67	58 128,33	1,34
Participante G	107 227,84	51 971,38	1,15
Participante H	150 321,86	57 175,31	1,54
Participante I	101 442,56	41 305,89	0,95
Participante J	155 930,21	81 218,21	1,75
Com controlador	MSE <sub>X</sub>	MSE <sub>Y</sub>	$P_{in}$
Participante A	82 971,79	30 170,62	0,77
Participante B	104 730,34	27 432,21	0,92
Participante C	96 515,71	17 797,74	0,81
Participante D	98 253,82	20 703,78	0,85
Participante E	148 964,94	31 985,81	1,30
Participante F	95 059,41	25 905,96	0,83
Participante G	81 599,02	29 276,90	0,75
Participante H	92 897,68	26 956,77	0,84
Participante I	95 525,52	43 254,57	0,94
Participante J	155 190,32	31 635,46	1,31

Nas experiências de escrita usando o sistema de Interação Facial Humano-Computador desenvolvido (figura 4.90), foi pedido a todos os participantes para escrever no teclado virtual <sup>22</sup> do computador a frase de Albert Einstein: “*Once we accept our limits, we go beyond them.*”.

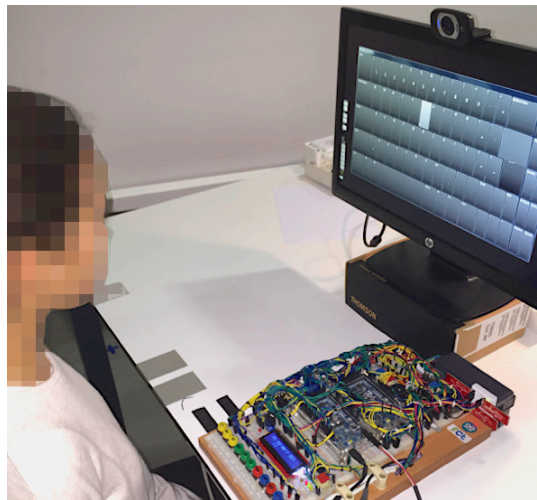


Figura 4.90: Experiência de mãos livres no teclado virtual, com a interface de assistência.

<sup>22</sup> Através dos movimentos da face, para a deslocação do cursor, e do pedal, para seleção da letra/símbolo.

O objetivo da tarefa no teclado virtual é escrever corretamente a frase de 45 caracteres de Albert Einstein, no intervalo de tempo mais curto possível. Neste tipo de experiências, a distância total a percorrer pelo cursor é aproximadamente constante, pelo que, a velocidade da tarefa de escrita se encontra inversamente relacionada com a duração total  $\Delta T_{VK}$  da mesma. Os resultados obtidos nas experiências de mãos livres, com o teclado virtual, são apresentados na tabela 4.22.

Tabela 4.22: Resultados das experiências de mãos livres, com o teclado virtual.

	Sem controlador		Com controlador	
	$\Delta T_{VK}$ (s)	$M(n_{tar} = 45)$	$\Delta T_{VK}$ (s)	$M(n_{tar} = 45)$
Participante A	249	4	138	0
Participante B	210	0	132	0
Participante C	284	0	246	0
Participante D	313	9	148	1
Participante E	312	7	161	2
Participante F	223	9	139	0
Participante G	331	4	200	2
Participante H	242	7	177	2
Participante I	201	0	121	0
Participante J	239	9	155	3

Os resultados da tabela 4.22, revelam uma melhoria significativa do desempenho da escrita em mãos livres, dos utilizadores humanos. De forma a quantificar o aumento do desempenho com o controlador de assistência, é considerada a expressão simplificada<sup>23</sup> (3.119) do capítulo 3 (subsecção 3.5.3), dada por  $J_c(n_{tar} = 45) = \frac{\Delta T_{VK} - \Delta T_{HO}}{\Delta T_{HO}} \psi(n_{tar} = 45)$ , com:  $\alpha_F = 1,1$ ;  $\gamma_F = 1,0$  (4.56) e assumindo  $\Delta T_{HO} = 50$ s como o tempo ideal da operação de escrita no teclado virtual da frase de 45 caracteres considerada, manipulando o rato do computador. Os participantes tiveram, em média, uma melhoria de desempenho  $J_c(n_{tar} = 45)$  de 6,14 para 2,84 com o controlador PID. Na escrita da frase com a interface de visão computacional e o controlador de assistência, pode verificar-se ainda que o valor aproximado de caracteres não escritos ou errados diminui, em média, de cinco caracteres para apenas um.

#### 4.6.2 Dispositivos microeletromecânicos

Neste trabalho foi desenvolvido um protótipo inovador com recurso a sensores microeletromecânicos, que permite o acesso ao computador a pessoas com necessidades especiais, ou não. O protótipo de *hardware* concebido é constituído por três módulos: o módulo de interface humana (figuras 4.91.a e 4.91.b), que é colocado numa parte do corpo como por exemplo na cabeça, e os módulos de comunicação por *Bluetooth*® mestre e escravo (figuras 4.92 e 4.93), com antena integrada. Os módulos de comunicação ligam respetivamente entre a saída de alimentação de +5 V e o módulo de interface humana (dispositivo mestre), e à porta USB, no caso do dispositivo escravo, permitindo a comunicação por *Bluetooth*® entre o utilizador humano e o computador. A mais valia da possibilidade da comunicação sem fios entre o utilizador humano e o computador deve-se ao facto de muitos dos utilizadores com necessidades especiais se deslocarem em cadeiras de rodas.

<sup>23</sup> Valores mais baixos indicam melhor desempenho.



#### 4.6.2.1 Protótipo de interface humana para o acesso ao computador

O Dispositivo de Interface Humana (HID) desenvolvido para o acesso ao computador, que recorre aos movimentos do operador humano, é constituído pelo microcontrolador MK20DX256VLH7, o Sistema Microeletromecânico (MEMS) TDK InvenSense® MPU-9250 (TDK InvenSense®, 2016) e o sensor barométrico TE Connectivity MS5637 (TE Connectivity, 2017).



Figura 4.91: Protótipo: (a) e (b) módulo HID; (c) dispositivo de comunicação escravo.

O dispositivo de comunicação mestre (figura 4.92), liga entre o cabo do módulo HID (figura 4.91.a) e a alimentação (+5 V), sendo constituído pelo módulo *Bluetooth*® RN-42 e por conversores de tensão de +5 V (TTL) para +3,3 V. O dispositivo de comunicação escravo (figuras 4.91.c e 4.93) contém o microcontrolador MK20DX256VLH7, um conector USB-A macho e o módulo RN-42.



Figura 4.92: Dispositivo de comunicação mestre, com dimensões de  $60 \times 21 \times 10$  mm.

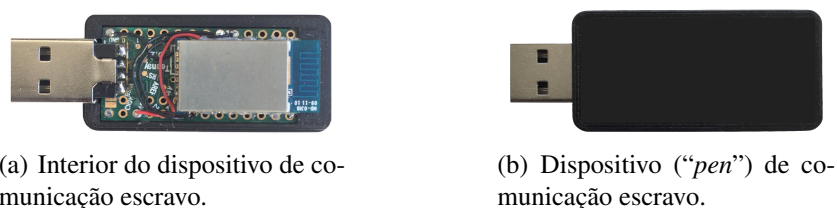


Figura 4.93: Dispositivo de comunicação escravo com ficha USB. As dimensões são de  $46 \times 22 \times 11$  mm.



A comunicação no módulo HID entre o microcontrolador MK20DX256VLH7, a unidade de captura de movimento MPU-9250 e o sensor barométrico MS5637 recorre ao protocolo de comunicação entre dispositivos I<sup>2</sup>C (Circuito Inter-integrado), funcionando a 400 kbit/s (*Fast mode*). A figura 4.94 ilustra o mapeamento (*mind map*) dos elementos associados ao protótipo desenvolvido.

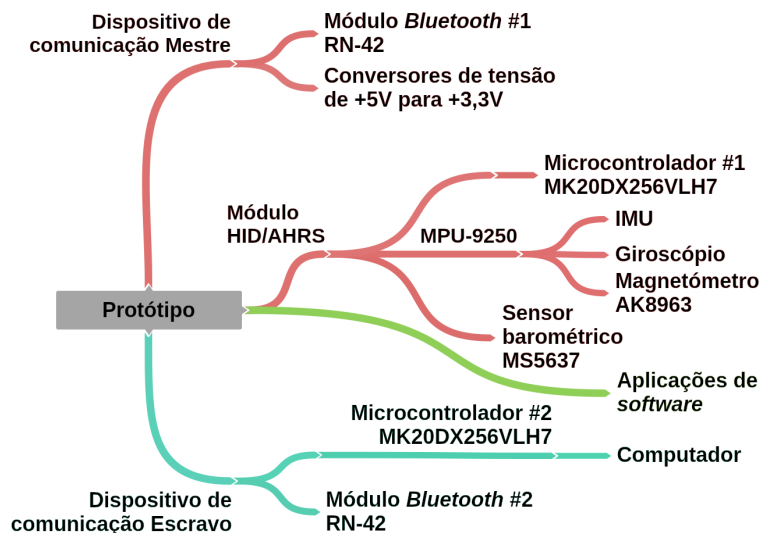


Figura 4.94: Mapa mental <sup>24</sup> dos elementos do protótipo de acesso ao computador via *Bluetooth*®.

Na figura 4.95 é apresentada a arquitetura geral do sistema. O utilizador humano executa movimentos com a cabeça para acesso ao computador, através do módulo HID. O dispositivo de comunicação mestre, liga ao módulo HID e comunica, via *Bluetooth*®, com o dispositivo escravo. Este último encontra-se ligado diretamente à porta USB do computador. Pode ser possível alimentar diretamente o dispositivo mestre com uma saída própria de +5 V, por exemplo, a partir de uma cadeira de rodas elétrica.

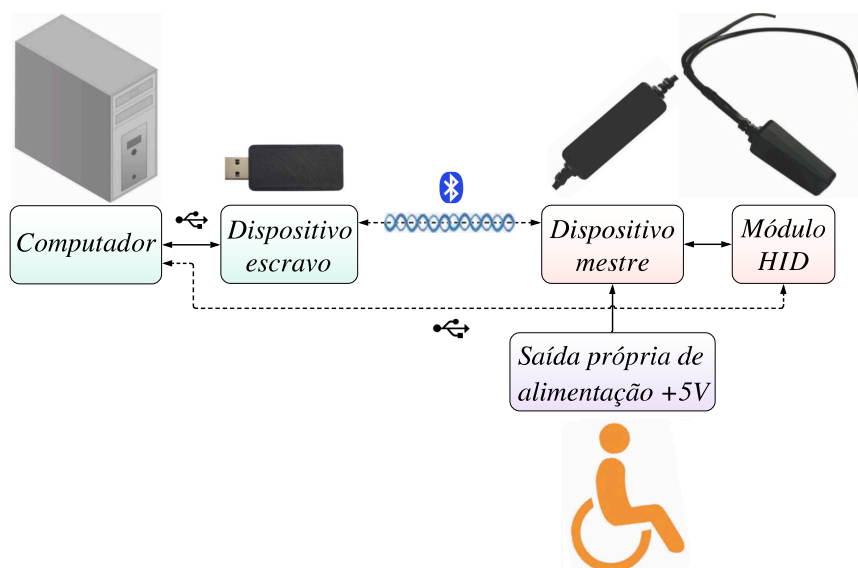
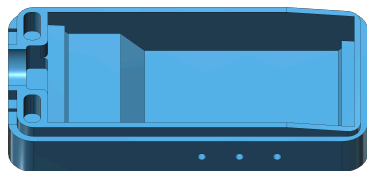


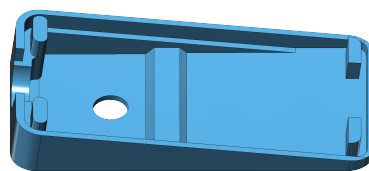
Figura 4.95: Arquitetura do sistema de acesso ao computador para pessoas com necessidades especiais.

<sup>24</sup> Elaborado com a ferramenta Coggle (<https://coggle.it/>).

Foram desenhadas caixas autoencaixáveis<sup>25</sup> (figuras 4.96 a 4.98) para cada um destes dispositivos, assim como para o módulo de funcionamento como Sistema de Referência de Atitude e Rumo (AHRS) (figuras 4.98, 4.100.b e 1.4.b), para se obter um protótipo/produto acabado.

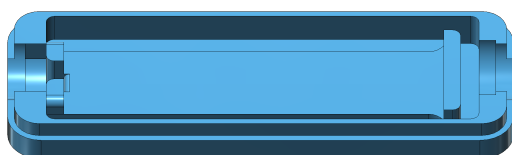


(a) Caixa de baixo do módulo HID.



(b) Caixa de cima do módulo HID.

Figura 4.96: Desenhos (formato STL) das caixas do módulo HID, de colocação na cabeça.



(a) Caixa de baixo do dispositivo de comunicação mestre.



(b) Caixa de cima do dispositivo de comunicação mestre.



(c) Caixa de baixo do dispositivo de comunicação escravo.

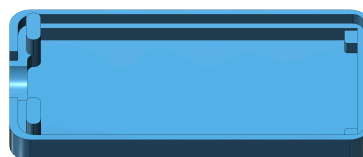


(d) Caixa de cima do dispositivo de comunicação escravo.

Figura 4.97: Desenhos (formato STL) das caixas autoencaixáveis para os dispositivos de comunicação por *Bluetooth*<sup>®</sup>: (a) e (b) mestre; (c) e (d) escravo.



(a) Caixa de baixo do módulo AHRS.



(b) Caixa de cima do módulo AHRS.

Figura 4.98: Desenhos (formato STL) das caixas autoencaixáveis do módulo AHRS.

<sup>25</sup> A utilização de parafusos de metal nas caixas dos módulos HID e AHRS não é recomendável, devido à utilização do magnetômetro AK8963 e à possibilidade de distorção da densidade local do campo magnético, provocada pela presença de metais na proximidade deste sensor. Por esta razão, as armações de óculos dos utilizadores do protótipo devem ser não metálicas.

As caixas do protótipo, desenhadas em formato STL (*Stereolithography*), foram produzidas em material PLA (Poliácido Láctico), com recurso a impressão 3D (Redwood et al., 2018).

A configuração do protótipo com comunicação por cabo, via USB 2.0 (figura 4.99), resulta numa arquitetura mais simples face à da figura 4.95, porque, neste caso, o módulo HID liga diretamente por cabo à porta USB do computador, o que permite a alimentação e a comunicação, não sendo necessários os módulos de comunicação *Bluetooth*<sup>®</sup> mestre e escravo.

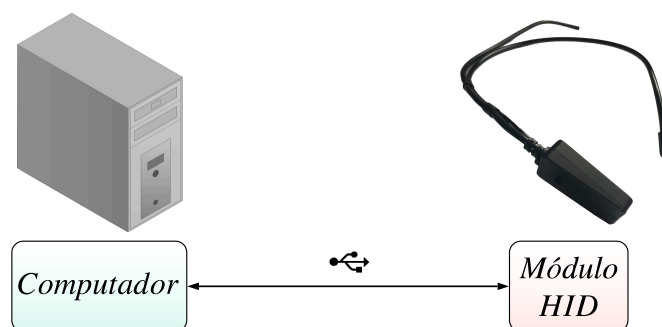


Figura 4.99: Arquitetura do sistema de acesso ao computador com ligação por cabo USB.

Saliente-se que quer o módulo HID, quer o módulo de comunicação escravo são constituídos pelo microcontrolador MK20DX256VLH7, podendo ambos operar em modo HCI, tal como um rato USB. Estes dois módulos podem ainda funcionar sem a aplicação de *software*, sendo possível mover o cursor e executar um clique esquerdo simples, o que é suficiente para que o utilizador possa, de seguida, executar a aplicação e dispor de um leque alargado de funcionalidades de acesso.

#### 4.6.2.2 Captura dos movimentos através do dispositivo microeletromecânico MPU-9250

Nos módulos HID e AHRS, a captura dos movimentos é realizada recorrendo-se às metodologias de fusão sensorial de Madgwick e de Mahony<sup>26</sup>, que filtram e processam a informação sensorial, devolvendo a orientação absoluta em quatérnios<sup>27</sup> (apêndice A). Os melhores resultados foram obtidos com o método de Mahony, garantindo este o menor deslocamento do cursor do computador na ausência de movimento.

A unidade de captura de movimento MPU-9250 possui dois modos de calibração: um modo para o IMU e outro para o magnetómetro AK8963 (Asahi Kasei), sendo que a calibração do IMU apenas necessita de ser realizada uma vez. A calibração do IMU do MPU-9250 é efetuada com o *hardware* em repouso e no plano horizontal, durante cerca de 1 s. A calibração do magnetómetro é realizada ondulando o sensor numa trajetória em forma de “oito deitado” (“∞”), durante cerca de 10 s, para adquirir o campo magnético em toda a superfície 3D. As discrepâncias “*hard iron*” referem-se à presença de campos magnéticos no meio envolvente, devida a materiais magnéticos

<sup>26</sup> Estas técnicas (Madgwick et al., 2011; Madgwick, 2010; Mahony et al., 2008; Mahony et al., 2005) revelam eficiências próximas das do Filtro de Kalman (Liu et al., 2014), requerendo um menor esforço computacional, o que permite a sua implementação em microcontroladores de baixo custo.

<sup>27</sup> Evitando-se assim a eventual perda de um grau de liberdade, ou seja, o surgimento do efeito indesejado de “*gimbal lock*” (O’Brien, 2010), bem expresso no incidente ocorrido durante a missão espacial Apollo 13 (Lovell & Kluger, 2000).

como ímanes e cabos de alimentação, enquanto que os desvios “*soft iron*” estão associados à existência de materiais ferromagnéticos à volta do sensor, que distorcem a densidade local do campo magnético terrestre (Caruso, 2000; Caruso, 1997). Os valores relativos aos desvios (“*offsets*”) das acelerações <sup>28</sup>, das velocidades angulares <sup>29</sup> e dos campos magnéticos <sup>30</sup> no espaço 3D, resultantes da calibração do IMU (acelerómetro e giroscópio) e do magnetómetro, podem ser guardados na EEPROM interna do microcontrolador do módulo HID. Na utilização do magnetómetro é tida ainda em conta a declinação magnética <sup>31</sup> do local onde se encontra o módulo HID, ou seja, o ângulo formado entre o Norte magnético e o Norte geográfico terrestre.

As figuras 4.100.a e 4.100.b mostram a orientação do módulo em Sistema de Referência de Atitude e Rumo (AHRS), em termos dos ângulos de navegação de Tait-Bryan, obtida através de uma aplicação de visualização <sup>32</sup> concebida no âmbito deste trabalho, em linguagem Processing.

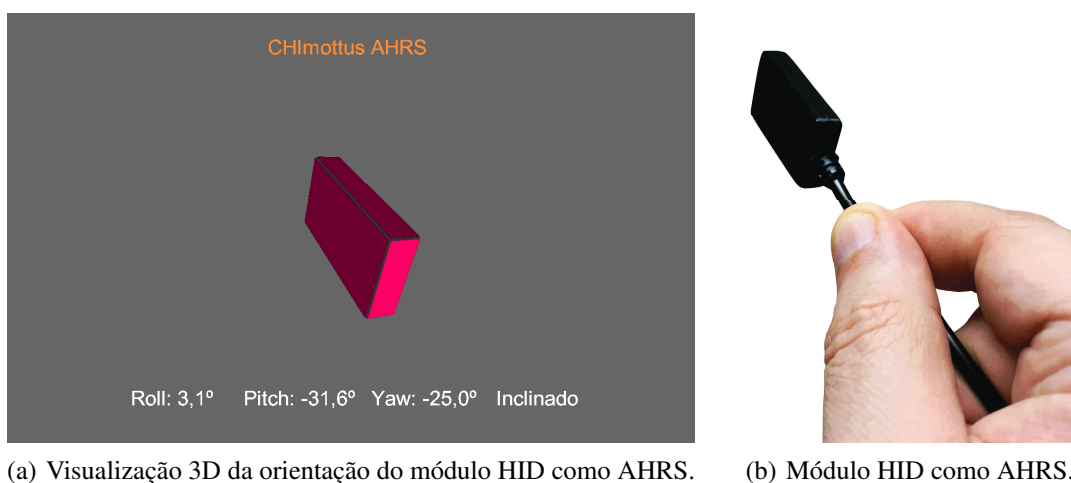


Figura 4.100: (a) Visualização, em Tempo-Real, da orientação (*roll*  $\phi$ , *pitch*  $\theta$  e *yaw*  $\psi$ ); (b) módulo AHRS.

Na figura 4.101 são ilustrados os ângulos de navegação de Tait-Bryan (*roll*  $\phi$ , *pitch*  $\theta$  e *yaw*  $\psi$ ) no Espaço Tridimensional.

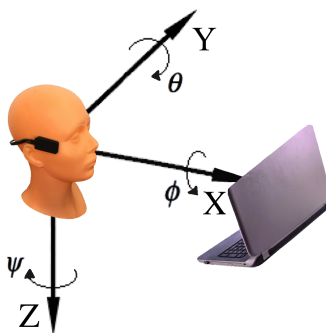


Figura 4.101: Ângulos *roll*  $\phi$ , *pitch*  $\theta$  e *yaw*  $\psi$  no Espaço Tridimensional.

<sup>28</sup> O acelerómetro triaxial utiliza o efeito piezoelétrico (Biswas & Gogoi, 2014) para detetar a aceleração.

<sup>29</sup> O giroscópio triaxial recorre ao efeito de Coriolis (Passaro et al., 2017) para obter a velocidade angular.

<sup>30</sup> O magnetómetro triaxial emprega o efeito de Hall (Brauer, 2014) para medir o campo magnético.

<sup>31</sup> <http://www.magnetic-declination.com/Portugal/Lisbon/2136221.html>.

<sup>32</sup> Compatível com os Sistemas Operativos macOS®, Windows® e Linux®.

Refira-se que no MPU-9250, os eixos X e Y do magnetómetro encontram-se trocados com os eixos X e Y do IMU, enquanto que o sentido relativo ao eixo Z do magnetómetro está invertido com o sentido relativo ao eixo Z do IMU. Para a conversão num vetor direcional da orientação do dispositivo de colocação na cabeça, é utilizada a matriz de rotação  $M_R$ , de (4.57), de acordo com Brito (2016).

$$M_R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\psi) & \cos(\psi) \sin(\phi) \sin(\theta) + \cos(\phi) \sin(\psi) & -\cos(\phi) \cos(\psi) \sin(\theta) + \sin(\phi) \sin(\psi) \\ -\cos(\theta) \sin(\psi) & \cos(\phi) \cos(\psi) - \sin(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) & \cos(\psi) \sin(\phi) + \cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) \\ \sin(\theta) & -\cos(\theta) \sin(\phi) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

Tendo agora em conta a orientação inicial do sensor MPU-9250, na configuração de colocação na cabeça (figura 4.101)<sup>33</sup>, a relação entre o vetor tridimensional de direção  $u_d$ , de coordenadas  $\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T$  e os ângulos de Tait-Bryan *roll*  $\phi$ , *pitch*  $\theta$  e *yaw*  $\psi$ , é dada por

$$u_d = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = M_R(:, 1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\psi) \\ -\cos(\theta) \sin(\psi) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

Atendendo às convenções de eixos da figura 4.101 e do ecrã (figura 4.86), as velocidades normalizadas horizontal  $v_{\text{horiz}}$  e vertical  $v_{\text{vert}}$  do cursor<sup>34</sup> são, respetivamente, obtidas por (4.59) e (4.60), sendo o vetor  $v_{\text{cur}}$ , associado à velocidade normalizada do cursor, calculado por (4.61).

$$v_{\text{horiz}} = -M_R(2, 1) = \cos(\theta) \sin(\psi) \quad (4.59)$$

$$v_{\text{vert}} = M_R(3, 1) = \sin(\theta) \quad (4.60)$$

$$v_{\text{cur}} = \begin{bmatrix} v_{\text{horiz}} \\ v_{\text{vert}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \sin(\psi) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

#### 4.6.2.3 Software desenvolvido para tecnologia assistiva

O protótipo de acesso ao computador para utilizadores com necessidades especiais funciona com uma aplicação para Windows<sup>®</sup><sup>35</sup>, concebida neste trabalho em linguagem C#, que identifica automaticamente a presença do módulo HID (*Plug and Play*), permitindo ao utilizador, sem o recurso das mãos, as mesmas tarefas de clique simples do botão esquerdo de um rato (figura 4.102.a), duplo clique (figura 4.102.b), em permanência (figura 4.102.c), assim como a funcionalidade adicional de arrastar e soltar (*drag and drop*) (figura 4.102.d) e a execução de um clique idêntico ao do botão direito de um rato (figura 4.102.e). Um clique é conseguido mantendo o cursor em repouso durante um certo intervalo de tempo de aceitação (*dwell time*), que corresponde ao intervalo de tempo a assegurar após a ausência de movimento no MPU-9250. A aplicação<sup>36</sup> permite ainda

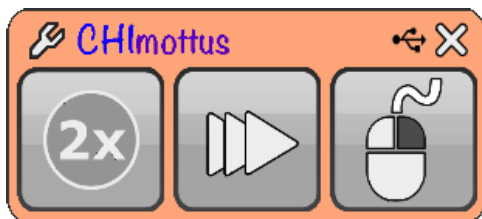
<sup>33</sup> A aplicação desenvolvida da figura 4.104 permite configurar o módulo HID para outra orientação: 'XZY', 'YXZ', 'YZX', 'ZXY' e 'ZYX', viabilizando a sua colocação em diferentes partes do corpo.

<sup>34</sup> No ecrã, o movimento horizontal positivo é para a direita e o movimento vertical positivo é para baixo.

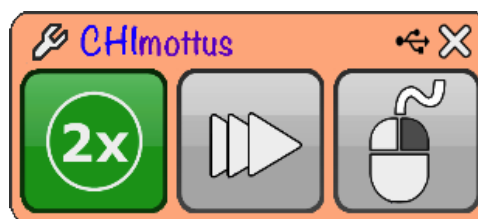
<sup>35</sup> A ferramenta Xamarin.Mac (<https://docs.microsoft.com/en-us/xamarin/mac/>) permite a criação de aplicações nativas para Mac em linguagem C#. A ferramenta MonoDevelop (<https://www.monodevelop.com/>) possibilita a exportação de código C# para os Sistemas Operativos macOS<sup>®</sup> e Linux<sup>®</sup>.

<sup>36</sup> Que indica automaticamente, em cima, à direita, o tipo de comunicação: por cabo USB ou Bluetooth<sup>®</sup>.

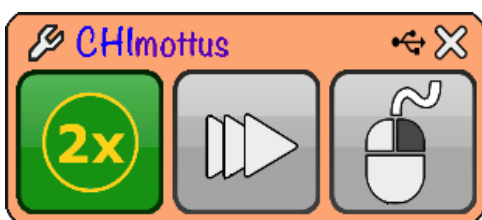
a mudança do funcionamento entre os modos rato e *gamepad/joystick* (figura 4.102.f) <sup>37</sup>. Nas figuras 4.102.c e 4.102.f as escolhas são efetuadas mantendo o cursor na opção respetiva (a verde) durante 3 s e 4 s.



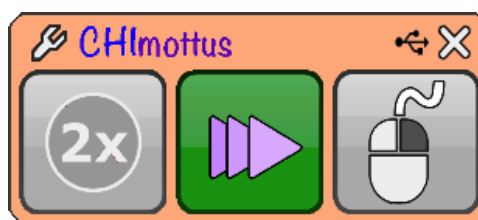
(a) Seleção equivalente ao clique simples do botão esquerdo de um rato (por defeito).



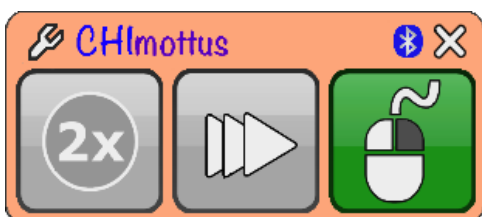
(b) Seleção equivalente ao duplo clique do botão esquerdo de um rato.



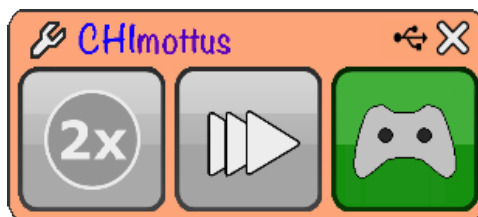
(c) Seleção equivalente ao duplo clique, em permanência, do botão esquerdo de um rato.



(d) Seleção equivalente à funcionalidade de arrastar e soltar (*drag and drop*) de um rato.



(e) Seleção equivalente ao clique simples do botão direito de um rato.

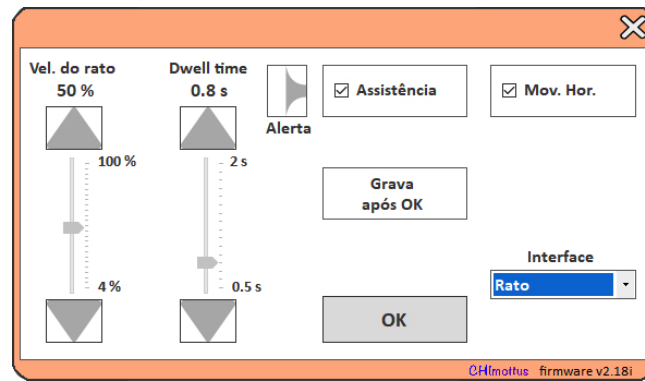


(f) Seleção para ativação do modo de funcionamento equivalente ao *gamepad/joystick*.

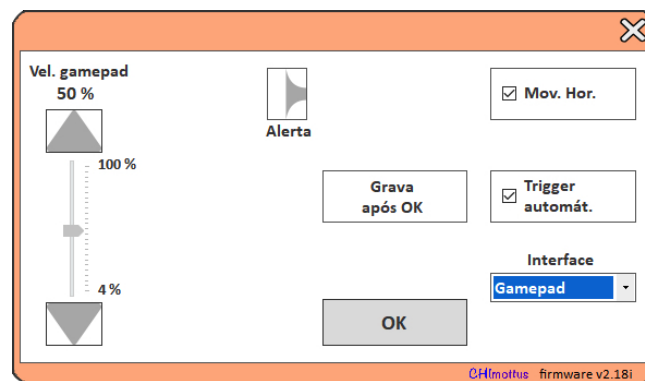
Figura 4.102: Diferentes modos de funcionamento da aplicação de *software* para acesso ao computador.

O utilizador pode aceder às configurações para os modos rato ou *gamepad/joystick* (figuras 4.103.a e 4.103.b). Para o modo rato (figura 4.103.a) é possível ajustar o *dwell time*, a velocidade do cursor, o recurso aos movimentos através do compasso ou da gravidade e a ativação do controlador de assistência. Existe ainda a possibilidade do utilizador, com necessidades especiais, poder gerar um sinal sonoro de alerta. As configurações para o modo *gamepad/joystick* (figura 4.103.b) possibilitam o ajuste da velocidade dos movimentos, a ativação ou não do “disparo” (*trigger*) automático, a deteção de movimento através do compasso ou da gravidade e a geração de alerta, podendo ambas as configurações ser gravadas na memória não-volátil do módulo HID. Foi ainda criada uma outra aplicação (figura 4.104), para configurações adicionais por um técnico administrador qualificado.

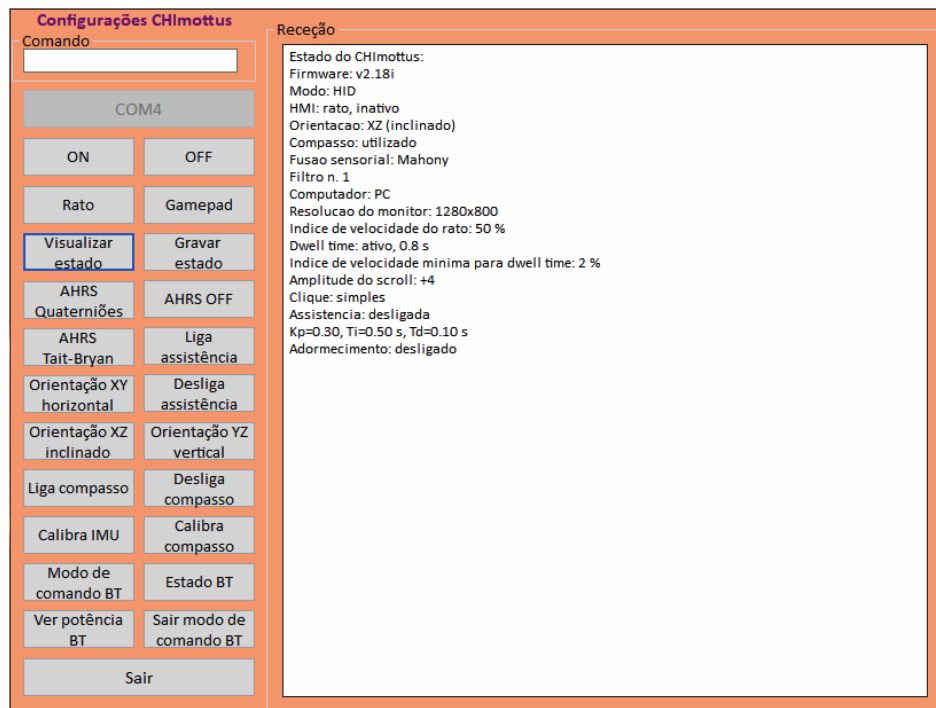
<sup>37</sup> No modo *gamepad/joystick*, o cursor encontra-se imobilizado, pelo que o retorno ao modo rato é efetuado ao fim de 30 s na ausência de movimento, após um aviso visual e sonoro prévio.



(a) Configurações da interface idêntica ao rato.



(b) Configurações da interface idêntica ao gamepad.

Figura 4.103: Configurações da aplicação de *software*, desenvolvida em linguagem C# para o protótipo.Figura 4.104: Aplicação, concebida em linguagem C#, para a leitura do estado e configuração do *hardware*.

#### 4.6.2.4 Funcionalidades adicionais do módulo HID

O módulo HID (figura 4.91.a), possui ainda um pequeno botão auxiliar de pressão. Um clique rápido no botão de pressão permite gerar eventos e interrupções, para inicializar a orientação do MPU-9250 e permitir, ou não, o início da movimentação do cursor do computador, ou ainda, no caso do dispositivo se encontrar em modo de aquisição/AHRS, de poder finalizar a mesma. Uma sucessão rápida de dois cliques no botão possibilita a mudança entre o modo de funcionamento de rato ou de *gamepad/joystick*. No caso do botão se manter pressionado durante mais de 5 segundos, será ativado o modo de calibração automática do magnetómetro <sup>38</sup> AK8963, que faz parte do MPU-9250 <sup>39</sup>. Todos estes comandos podem também ser executados por *software*, por intermédio da aplicação concebida da figura 4.104. Através desta aplicação é ainda possível a configuração e a gravação, em memória não-volátil, dos referenciais de orientação inicial do módulo HID, dos parâmetros de filtragem <sup>40</sup> dos métodos de fusão sensorial adotados e da resolução do ecrã.

#### 4.6.2.5 Projeto do controlador de assistência

De acordo com os estudos de Ragazzini (1948), um dos modelos mais simples do controlador humano é considerado como sendo um Controlador Proporcional e Derivado (PD), definido por

$$H(s) = \frac{K_{dh}s + K_{ph}}{T_N s + 1} e^{-\tau s} \quad (4.62)$$

no qual  $K_{dh}$  e  $K_{ph}$  correspondem, respetivamente, ao ganho derivado e ao ganho proporcional do controlador do cérebro humano,  $T_N$  a uma constante de tempo do sistema neuromuscular e  $\tau$  ao atraso de tempo de reação. Estes parâmetros alteram-se com o estado do operador e com as condições da operação. Os trabalhos realizados por Suzuki et al. (2006), revelaram que o progresso que advém do processo de aprendizagem pode ser encarado como um processo lento, variante no tempo, sendo o atraso de uma tarefa PTP praticamente constante e independente do desempenho do operador. Deste modo a constante de tempo de atraso  $\tau$  pode ser desprezada para efeitos de identificação e o modelo simplificado do controlador humano  $H(s)$  passa a ser

$$H(s) \approx \frac{K_{dh}s + K_{ph}}{T_N s + 1} \quad (4.63)$$

A função de transferência do controlador humano  $H(s)$  de (4.63) pode ser escrita na forma

$$H(s) = K_1 \frac{s + a_h}{s + b_h} \quad a_h, b_h, K_1 \in \mathbb{R}^+ \quad (4.64)$$

<sup>38</sup> Também denominado de compasso eletrónico.

<sup>39</sup> O detetor de movimento InvenSense® MPU-9250, de 9 graus de liberdade (TDK InvenSense®, 2018), com acelerómetro, giroscópio e magnetómetro integrado, é atualmente, a nível mundial, o dispositivo de captura de movimento de menores dimensões. O detetor MPU-9250 é um SiP (*System in Package*), que conjuga dois chipsets: o MPU-6500 (que contém um giroscópio triaxial de 16 *bits*, medindo velocidades angulares até  $\pm 35 \text{ rad s}^{-1}$  e um acelerómetro triaxial de 16 *bits*, que permite detetar acelerações até  $\pm 157 \text{ m s}^{-2}$ ), e o magnetómetro triaxial AK8963 de 16 *bits*, capaz de medir densidades de fluxo magnético até  $\pm 4800 \mu\text{T}$ .

<sup>40</sup> O que pode relevar, no caso da ocorrência de movimentos involuntários, provocados por perturbações não progressivas dos movimentos, associadas à paralisia cerebral (APCC, 2017).



sendo  $s = -a_h$  e  $s = -b_h$  respetivamente o zero e o polo de  $H(s)$ , e  $K_1$  uma constante do sistema. O ganho proporcional  $K_{ph}$  e o ganho derivado  $K_{dh}$  do controlador PD humano são definidos por

$$K_{ph} = \frac{a_h K_1}{b_h} \quad (4.65)$$

e

$$K_{dh} = \frac{K_1}{b_h} \quad (4.66)$$

A constante de tempo do sistema neuromuscular humano  $T_N$  é obtida por

$$T_N = \frac{1}{b_h} \quad (4.67)$$

sendo o ganho estático  $K_0$  do sistema  $H(s)$  de (4.64) calculado por

$$K_0 = \frac{a_h K_1}{b_h} = K_{ph} \quad (4.68)$$

A figura 4.105 ilustra o diagrama de blocos do sistema resultante, em anel fechado, formado pelo utilizador humano  $H(s)$  e pelo *hardware* de acesso ao computador que caracteriza o movimento do cursor ( $m_0/s$ ), para cada um dos eixos (abscissas e ordenadas) do ecrã do computador, com a opção do Sistema Operativo relativa à Exatidão Melhorada do Ponteiro (EPP) desativada.

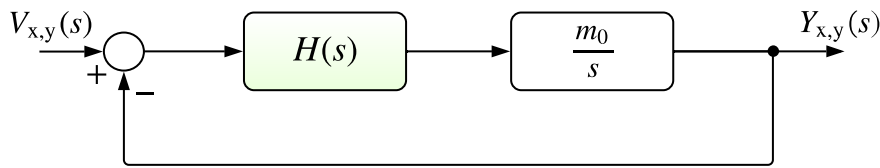


Figura 4.105: Diagrama de blocos da interface humano-computador, em modo de “rato”.

A função de transferência  $G_{x,y}(s)$  do sistema que agrega o humano e o dispositivo HID é

$$G_{x,y}(s) = \frac{Y_{x,y}(s)}{V_{x,y}(s)} = \frac{\frac{m_0}{s} H(s)}{1 + \frac{m_0}{s} H(s)} \quad (4.69)$$

resultando de (4.64) e de (4.69)

$$G_{x,y}(s) = \frac{m_0 K_1 (s + a_h)}{s^2 + (m_0 K_1 + b_h) s + m_0 K_1 a_h} \quad (4.70)$$

o que corresponderá, para cada um dos eixos, a um sistema de segunda ordem estável, constituído por dois polos reais negativos e um zero, admitindo a condição  $2m_0 K_1 (2a_h - b_h) \leq b_h^2 + (m_0 K_1)^2$ . Os sistemas resultantes podem ser identificados por uma estrutura ARX <sup>41</sup> em tempo discreto para

<sup>41</sup> O comando MATLAB® *ident*, da *toolbox* de identificação de sistemas, providencia o surgimento de uma Interface Gráfica do Utilizador (GUI), permitindo a identificação deste tipo de estrutura ARX através de Mínimos Quadrados (LS), devolvendo os valores dos parâmetros  $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$  e  $T_z$  do modelo resultante em anel fechado que agrega o utilizador humano e o módulo HID, sob a forma da função de transferência  $G(s)$  de (4.71), para cada um dos eixos do ecrã do computador.

cada eixo (3.25), com  $na = 2$ ,  $nb = 2$  e  $nd = 1$ , desprezando o atraso, correspondendo à função de transferência  $G_{x,y}(s)$  em tempo contínuo

$$G_{x,y}(s) = \frac{1 + T_z s}{(1 + T_{p1} s)(1 + T_{p2} s)} \quad (4.71)$$

com

$$a_h = \frac{1}{T_z} \quad (4.72)$$

$$b_h = \frac{T_{p1} + T_{p2} - T_z}{T_{p1} T_{p2}} \quad (4.73)$$

e

$$K_1 = \frac{T_z}{m_0 T_{p1} T_{p2}} \quad (4.74)$$

De (4.64), (4.72), (4.73) e (4.74) resultará

$$H_{x,y}(s) = \frac{T_z}{m_0 T_{p1} T_{p2}} \left( \frac{s + \frac{1}{T_z}}{\frac{T_{p1} + T_{p2} - T_z}{T_{p1} T_{p2}} + s} \right) \quad (4.75)$$

O parâmetro  $m_0 = 0,1458$  de (4.69) é obtido experimentalmente, sendo proporcional ao módulo da velocidade do cursor do computador movendo-se num dos eixos do ecrã, com o dispositivo HID em modo de funcionamento como rato. A velocidade do cursor foi convencionada por forma a corresponder, sem EPP, a uma rotação (*yaw*  $\psi$ ) da cabeça (figura 4.101) de  $\pm 10^\circ = \pm \frac{\pi}{18}$  rad.

Na figura 4.106 é apresentado o diagrama de blocos do sistema de assistência de acesso ao computador, em anel fechado, que inclui o Controlador Proporcional, Integral e Derivado  $C_{PID}(s)$ , sintonizado através do algoritmo de otimização dos pirilampos (algoritmo 3.6), descrito no capítulo 3 (subsubsecção 3.4.5.1). Trata-se de uma arquitetura baseada num esquema de controlo em cascata, que recorre à “intenção” do operador e em que o controlador  $C_{PID}(s)$  com *anti-windup* é sintonizado por meio de um algoritmo de otimização inspirado na natureza, tendo em conta o modelo estimado do humano  $H(s)$ , uma especificação e um determinado conjunto de restrições.

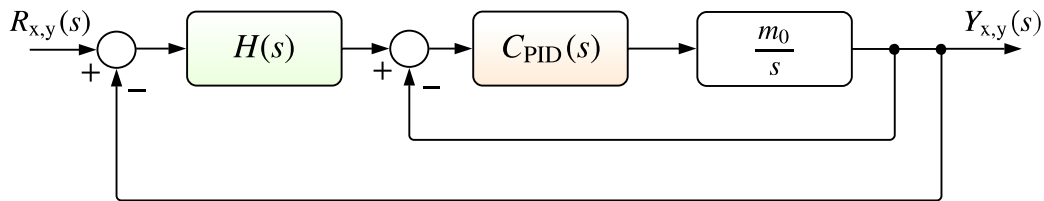


Figura 4.106: Arquitetura de controlo em cascata do sistema de acesso ao computador, para cada eixo.

A função de transferência  $L_{HCR}(s)$  do sistema resultante de controlo de anel fechado, para cada eixo do ecrã (abscissas e ordenadas), é obtida por

$$L_{HCR_{x,y}}(s) = \frac{Y_{x,y}(s)}{R_{x,y}(s)} = \frac{m_0 H(s) C_{PID}(s)}{s + (H(s) + 1) m_0 C_{PID}(s)} \quad (4.76)$$

com

$$C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.77)$$

De (4.75), (4.76) e (4.77) virá para o sistema resultante  $L_{HCR}(s)$ , em cada eixo

$$L_{HCR_{x,y}}(s) = \frac{\frac{K_p T_z}{T_{p1} T_{p2}} \left( \frac{s + \frac{1}{T_z}}{\frac{T_{p1} + T_{p2} - T_z}{T_{p1} T_{p2}} + s} \right) \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)}{s + K_p \left( \frac{T_z}{T_{p1} T_{p2}} \frac{s + \frac{1}{T_z}}{\frac{T_{p1} + T_{p2} - T_z}{T_{p1} T_{p2}} + s} + m_0 \right) \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)} \quad (4.78)$$

O método de sintonia do controlador PID é o descrito no algoritmo 3.6 (Algoritmo dos Pirilampos), tendo em conta o coeficiente de absorção luminosa  $\gamma = 1,0$ , a atratividade  $\beta_0 = 1,0$ , a aleatoriedade  $\alpha = 0,2$  e o fator de redução da aleatoriedade (ou parâmetro de mutação)  $v = 0,98$ . Na figura 4.107 é apresentado um exemplo de evolução do algoritmo, com 20 pirilampos e 10 iterações, tendo em conta o modelo (4.75) do operador humano A, com  $T_{p1} = 0,777$ ,  $T_{p2} = 0,874$  e  $T_z = -0,245$ .

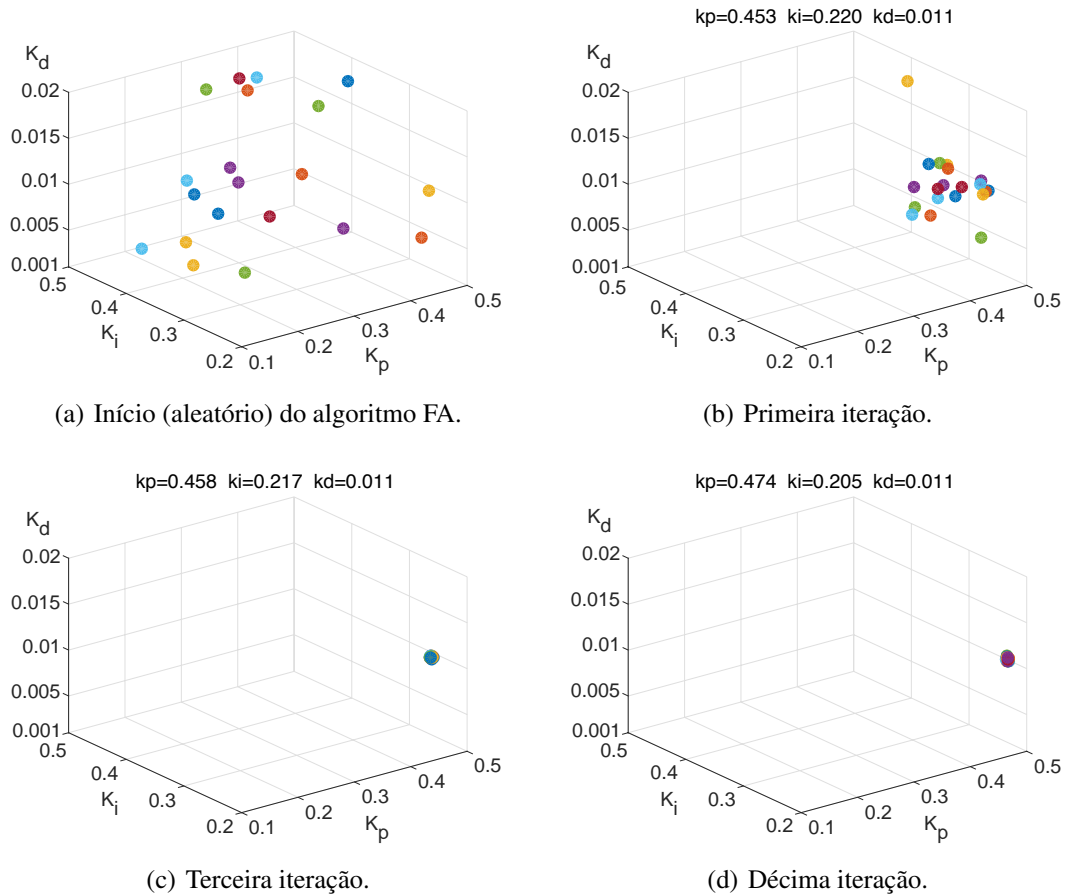


Figura 4.107: Convergência do algoritmo FA no espaço de procura  $\{K_p, K_i, K_d\} \subset \mathbb{R}^3$ , com 20 pirilampos.

O objetivo é encontrar os valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  que minimizam a especificação para  $L_{HCR}(s)$ , tendo como restrições:  $0,1 \leq K_p \leq 0,5$ ;  $0,2 \leq K_i \leq 0,5$  e  $0,001 \leq K_d \leq 0,02$ . A especificação:

$\min \{0,3 |sobrele - 10| + 0,5 |tempo\_subida - 3| + 0,2 |tempo\_estabelec - tempo\_subida - 2|\}$  permite caracterizar a resposta ao degrau do sistema  $L_{HCR}(s)$  com o operador especialista (A).

As restrições aos ganhos do controlador PID no espaço de procura tridimensional ( $d = 3$ ) tomam em consideração os ganhos proporcional  $K_p$  e integral  $K_i$  não serem superiores a 0,5 e o ganho derivado  $K_d$  ser inferior a 0,02 para que a resposta ao degrau <sup>42</sup> do sistema de controlo humano-computador com retroação não se torne demasiado rápida, podendo gerar instabilidade, e ainda para que seja possível minimizar os tempos de subida e de estabelecimento. A metodologia proposta de otimização inspirada na natureza garante a melhoria do desempenho na movimentação e atuação do cursor do computador pelos utilizadores humanos sem e com necessidades especiais, conforme mostram os resultados experimentais descritos da subsubsecção 4.6.2.6.

#### 4.6.2.6 Validação experimental do protótipo

Parte dos testes iniciais do protótipo concebido foram realizados em instituições de apoio a pessoas com necessidades especiais, designadamente no Hospital Nossa Senhora da Arrábida (HNSA), na Associação Portuguesa de Esclerose Lateral Amiotrófica (APELA) e na Cooperativa para a Educação e Reabilitação de Cidadãos Inadaptados do Seixal e Almada (CERCISA).

Foram efetuadas 500 ações Ponto-a-Ponto (PTP) (15MB de dados), com a distância  $A = \{300px, 400px, 500px, 600px, 700px\}$  aos alvos constante, sem e com controladores. Cada tarefa de seguimento com o cursor do computador com EPP <sup>43</sup>, que utiliza o dispositivo HID de colocação na cabeça, ligado ao computador via cabo USB (figuras 4.108 e 4.99), consiste em seguir o alvo aleatório à distância  $A$  e com diâmetro constante ( $W = 100px$ ), cuja posição no ecrã se altera de 10 s em 10 s, durante 100 s ( $n_{tar} = 10$ ).

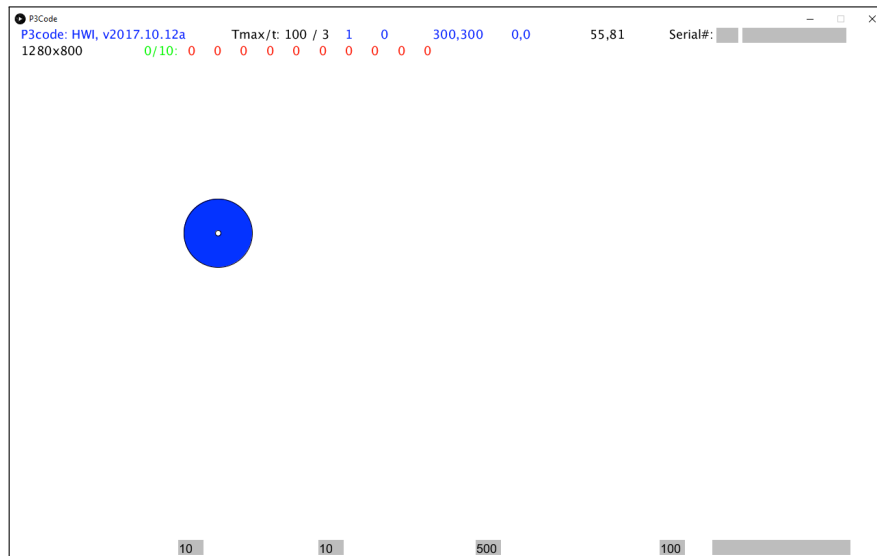


Figura 4.108: Aplicação desenvolvida para a realização de experiências PTP, com o dispositivo HID. A resolução do ecrã é de  $1280 \times 800$  pixels.

<sup>42</sup> Que ocorre necessariamente numa tarefa Ponto-a-Ponto (PTP).

<sup>43</sup> A ativação da opção da Exatidão Melhorada do Ponteiro (EPP) do Sistema Operativo Windows®10 permite melhorar o desempenho, tendo sido utilizada pelos participantes.

Cada controlador PID com *anti-windup* é projetado através do Algoritmo dos Pirilampos (com 5 tentativas, 20 pirilampos e 10 iterações), tendo em conta um modelo matemático para cada utilizador humano (A a E), estimado através de uma estrutura ARX em um dos eixos (X), com  $na = 2$ ,  $nb = 2$  e  $nd = 1$ , desprezando o atraso, conforme (4.75), para a frequência de funcionamento de 50 Hz ( $T_s = 20$  ms), o coeficiente  $N_{PID} = 10$  do filtro e a constante de tempo de *anti-windup*  $T_t = 1$  s. A implementação do controlador PID ajustável, com *anti-windup*, no microcontrolador do dispositivo HID foi realizada recorrendo à linguagem de programação C. As figuras 4.109 e 4.110 mostram um exemplo de evolução temporal dos sinais de referência (assinalados a traço e ponto) dos alvos aleatórios PTP no ecrã, em X e em Y, e dos correspondentes sinais obtidos do movimento do cursor do computador efetuado pelo operador B, sem e com controlador.

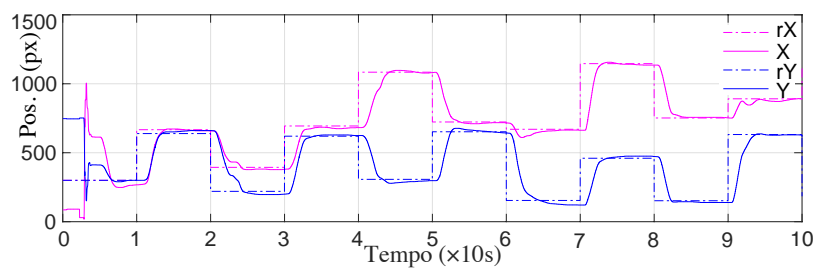


Figura 4.109: Sinais PTP dos alvos aleatórios de referência, em X e em Y, e de resposta do participante B, sem controlador.

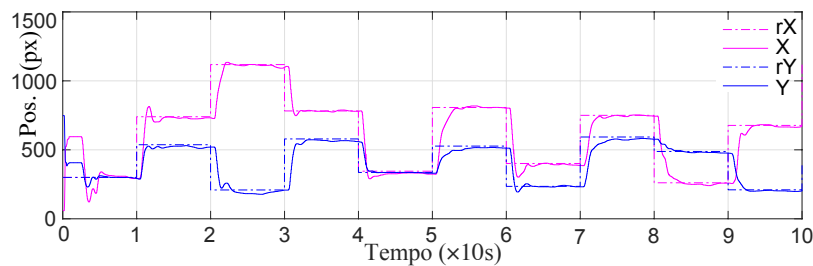


Figura 4.110: Sinais PTP dos alvos aleatórios de referência, em X e em Y, e de resposta do participante B, com controlador.

Na tabela 4.23 são apresentados os resultados obtidos <sup>44</sup> para os participantes A a E, sem e com os controladores PID, relativos à duração  $T_{PTP}$  (3.95) das experiências, considerando o método de fusão sensorial de Mahony et al. (2008). Os melhores resultados são mostrados a cor verde.

A primeira medida de desempenho adotada é a do modelo simplificado de desempenho para tecnologia assistiva em tarefas PTP, descrito no capítulo 3 (subsecção 3.5.3), definido, neste caso, por  $J_c(n_{tar} = 10) = \frac{T_{PTP} - \Delta THI_A}{\Delta THI_A} \psi(n_{tar} = 10)$ , com  $\alpha_F = 1,1$  e  $\gamma_F = 1,0$ . O conjunto de valores de  $\Delta THI_A = \{1,23; 1,50; 1,91; 1,82; 2,43\} (\times 10s)$  da tabela 4.23 corresponde ao menor valor de  $T_{PTP}$  para cada distância constante  $A$  aos alvos, realizada pelo operador A (especialista), com controlador. Na tabela 4.24 são apresentados os valores da medida de desempenho  $J_c(n_{tar} = 10)$  e do número de falhas  $M(10)$  para todos os participantes (A a E), sem e com os controladores.

<sup>44</sup> A deslocação horizontal do cursor do computador, através da rotação horizontal da cabeça, implicou o recurso ao magnetómetro triaxial AK8963 (Asahi Kasei, 2013).

Tabela 4.23: Resultados das experiências PTP com o protótipo, sem e com os controladores, para uma sequência de 10 tarefas PTP aleatórias ( $n_{tar} = 10$ ), com a distância constante  $A$  aos alvos.

	$T_{PTP} (\times 10 \text{ s})$				
<b>Sem controlador</b>	$A = 300 \text{ px}$	$A = 400 \text{ px}$	$A = 500 \text{ px}$	$A = 600 \text{ px}$	$A = 700 \text{ px}$
Participante A	1,97	2,28	2,98	3,46	3,54
Participante B	2,61	3,17	3,35	3,33	3,37
Participante C	7,41	7,09	9,36	8,12	9,51
Participante D	3,45	2,87	3,45	3,39	4,10
Participante E	3,40	4,42	5,54	5,44	6,17
<b>Com controladores</b>	$A = 300 \text{ px}$	$A = 400 \text{ px}$	$A = 500 \text{ px}$	$A = 600 \text{ px}$	$A = 700 \text{ px}$
Participante A	1,23	1,50	1,91	1,82	2,43
Participante B	1,74	2,26	2,33	2,52	2,73
Participante C	3,75	6,31	4,59	6,36	6,74
Participante D	2,33	2,58	2,72	2,89	2,63
Participante E	3,27	3,32	2,99	4,22	3,82

Tomando por base o modelo de desempenho de Fitts, descrito no capítulo 3 (subsecção 3.5.1 e subsubsecção 3.5.1.1), admitindo a formulação de Shannon ( $c = 1$ ), o Índice de Desempenho do Operador Humano (HPI), relativo à taxa de processamento de informação no movimento de aproximação ao alvo, é definido em (3.90) por  $I_{P_{TP}} = 1/b$ , sendo o declive  $b$  uma constante da interface, obtida por regressão linear. Os valores de  $I_{P_{TP}}$  são mostrados na tabela 4.25, sendo que valores maiores de  $I_{P_{TP}}$  indicam melhores desempenhos. Na tabela 4.25 são ainda apresentados os valores médios de  $J_c(n_{tar} = 10)$  e de  $T_{PTP}$ , e os respetivos desvios padrões, onde menores valores médios de  $J_c(n_{tar} = 10)$  e de  $T_{PTP}$  denotam melhores desempenhos.

Os resultados obtidos das figuras 4.109, 4.110 e das tabelas 4.23, 4.24 e 4.25, permitem concluir que os controladores projetados <sup>45</sup> melhoram o desempenho nas tarefas PTP de acesso ao computador com o protótipo, em mãos livres, resultando numa diminuição da duração média das tarefas de 44 %, numa diminuição do valor médio dos desvios padrões da duração das tarefas de 29 %, num aumento do valor médio do índice de desempenho relativo à taxa de processamento de informação  $I_{P_{TP}}$  de 44 % e no decréscimo do valor médio das falhas de 2,20 para 0,40.

A matriz resultante  $K_{PID}$  dos valores dos parâmetros <sup>46</sup>  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  dos cinco controladores PID com *anti-windup*, implementados no *hardware* do protótipo e sintonizados por aplicação do Algoritmo dos Pirilampos (FA) aos modelos estimados dos participantes, tendo em conta as restrições e a especificação da resposta ao degrau do participante A especialista, é

$$K_{PID} = \begin{bmatrix} K_{pA} & K_{iA} & K_{dA} \\ K_{pB} & K_{iB} & K_{dB} \\ K_{pC} & K_{iC} & K_{dC} \\ K_{pD} & K_{iD} & K_{dD} \\ K_{pE} & K_{iE} & K_{dE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,47 & 0,21 & 0,01 \\ 0,50 & 0,20 & 0,01 \\ 0,44 & 0,22 & 0,01 \\ 0,50 & 0,20 & 0,01 \\ 0,50 & 0,24 & 0,02 \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

<sup>45</sup> O tempo médio de execução do algoritmo FA, com 20 pirilampos e 5 tentativas, foi de cerca de 5 min e 30 s, com um processador de 2 núcleos Intel® Core™ i5-6300U a 2,40 GHz, da microarquitetura Skylake.

<sup>46</sup> A relação entre  $\{K_p, K_i, K_d\}$  e  $\{T_i, T_d\}$  é dada por (3.65) e (3.66).

Tabela 4.24: Função de custo  $J_c(n_{tar} = 10)$  e número de falhas  $M(10)$  sem e com os controladores, para uma sequência de 10 tarefas PTP aleatórias ( $n_{tar} = 10$ ), com a distância constante  $A$  (em *pixels*) aos alvos.

$J_c(n_{tar} = 10), M(10)$										
$A(px)$	300	300	400	400	500	500	600	600	700	700
<b>Sem controlador</b>	$J_c$	$M(10)$	$J_c$	$M(10)$	$J_c$	$M(10)$	$J_c$	$M(10)$	$J_c$	$M(10)$
Participante A	0,68	0	0,59	0	0,64	0	1,03	0	0,52	0
Participante B	1,28	0	1,27	0	1,13	1	1,35	2	0,63	2
Participante C	8,64	3	7,11	6	8,08	10	7,04	9	5,93	9
Participante D	2,71	1	1,37	1	0,92	0	1,30	1	0,78	0
Participante E	2,01	0	3,35	3	2,85	1	2,99	1	2,85	5
<b>Com controladores</b>	$J_c$	$M(10)$	$J_c$	$M(10)$	$J_c$	$M(10)$	$J_c$	$M(10)$	$J_c$	$M(10)$
Participante A	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
Participante B	0,47	0	0,58	0	0,25	0	0,44	0	0,14	0
Participante C	3,52	3	4,82	1	1,60	0	4,29	3	2,89	2
Participante D	1,02	0	0,82	0	0,48	0	0,67	0	0,09	0
Participante E	2,49	1	1,38	0	0,64	0	1,50	0	0,65	0

Tabela 4.25: Valores de desempenho dos participantes humanos A a E, sem e com os controladores.

	$I_{PTP}$	$R^2$	$\mu(J_c(n_{tar} = 10))$	$\sigma(J_c(n_{tar} = 10))$	$\mu(T_{PTP})(\times 10s)$	$\sigma(T_{PTP})(\times 10s)$
<b>Sem controlador</b>						
Participante A	0,63	0,96	0,69	0,20	2,85	0,70
Participante B	1,53	0,78	1,13	0,29	3,17	0,32
Participante C	0,53	0,55	7,36	1,04	8,30	1,10
Participante D	1,70	0,34	1,42	0,76	3,45	0,44
Participante E	0,41	0,94	2,81	0,49	4,99	1,09
<b>Com controladores</b>						
Participante A	1,02	0,88	0,00	0,00	1,78	0,45
Participante B	1,21	0,95	0,38	0,18	2,32	0,37
Participante C	0,45	0,55	3,42	1,26	5,55	1,30
Participante D	2,77	0,59	0,62	0,35	2,63	0,21
Participante E	1,44	0,38	1,33	0,76	3,52	0,49

Os valores de  $R^2$  com o protótipo <sup>47</sup>, também apresentados na tabela 4.25, verificam a tendência, que se traduz por melhores desempenhos nos participantes cujas ações mais se aproximam à lei de Fitts (participantes A e B), tendência que também se constata na análise dos resultados relativos às experiências com a interface *pen tablet*, descrita no capítulo 3 (subsubsecção 4.4.4.2).

#### 4.6.2.7 Comentários finais

O protótipo de *hardware/software* com a ativação do controlador de assistência para o utilizador humano, melhora o desempenho, permitindo a substituição de interfaces de acesso ao computador que requerem as tarefas manuais. A importância das mãos pode ser comprovada através do modelo

<sup>47</sup> O coeficiente de determinação  $R^2$ , definido em (3.93), representa a proporção da variância na variável dependente, resultante da(s) variável(eis) independente(s).

do homúnculo motor (figura 4.111), inicialmente proposto por Penfield & Boldrey (1937), que consiste numa representação de como seria o corpo humano se o tamanho das suas partes crescesse em proporção com a área do cérebro associada às respetivas funções motoras, localizadas no sulco central do córtex frontal (figura 2.5). Estas funções desenvolvem-se de forma única para cada indivíduo, dependendo de fatores como o treino e a aprendizagem.



Figura 4.111: Modelo tridimensional do homúnculo motor (adaptado de Science Photo Library).

O Dispositivo de Interface Humana (HID) possui ainda um mecanismo de auto-calibração, desenvolvido no âmbito deste trabalho, que evita desvios devidos aos erros de integração e às variações da temperatura ambiente, e um modo de adormecimento na ausência de movimento, para a redução do consumo de energia do dispositivo HID e do rádio *Bluetooth*<sup>®</sup> do módulo de comunicação mestre. É também possível a deteção automática da resolução do ecrã e ainda o ajuste dos parâmetros de filtragem dos métodos de fusão sensorial de Mahony e de Madgwick, através da aplicação concebida da figura 4.104, de modo a poder compensar os movimentos humanos involuntários (discinesia).

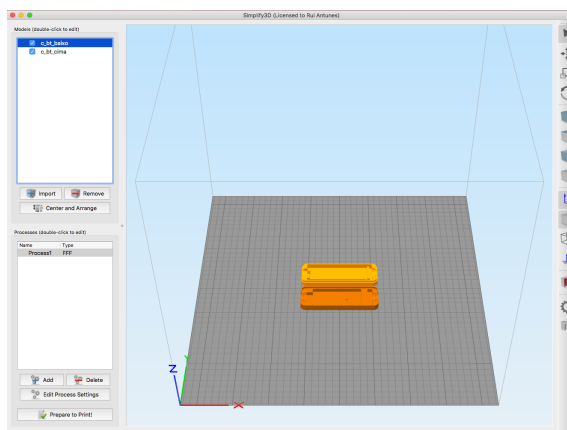
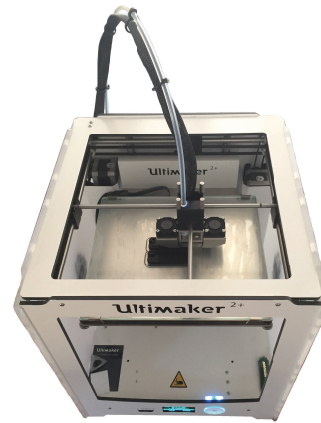
O Controlador Proporcional, Integral e Derivado (PID) do protótipo de *hardware/software* desenvolvido pode ser configurado, de forma personalizada, para as necessidades específicas de cada utilizador, possibilitando o ajuste dos valores <sup>48</sup> dos parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  do controlador e ainda o seu armazenamento, em memória não-volátil, no microcontrolador ARM<sup>®</sup> do módulo HID, através da aplicação de *software* de configuração concebida (figura 4.104).

O protótipo encontra-se concluído, tendo-se recorrido à impressão 3D (figura 4.112.b) para a construção das caixas em material PLA <sup>49</sup> destinadas ao *hardware*. A conversão dos desenhos, criados por computador, do formato STL para o formato G-code (Smid, 2007) é efetuada através da ferramenta de *software* Simplify3D<sup>®</sup> (figura 4.112.a).

<sup>48</sup> A possibilidade da personalização do protótipo de acesso ao computador à medida do comportamento e das capacidades relevantes de cada utilizador humano, caracterizado através de um modelo matemático simplificado, representa uma conceção inovadora em tecnologia assistiva.

<sup>49</sup> Outros materiais podem também ser empregues em impressão 3D por Fabrico de Filamento Fundido, sendo os mais comuns o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), o CPE (Co-Poliéster) e o *Nylon*. O bioplástico PLA (Poliácido Láctico), produzido pela polimerização do ácido láctico resultante da fermentação de vegetais ricos em amido, como o milho, o trigo ou a beterraba, possui a vantagem de ser biodegradável, biocompatível e reciclável.



(a) *Software* de fatiamento tridimensional.

(b) Impressão 3D por FFF.

Figura 4.112: (a) *Software* Simplify3D®<sup>50</sup>; (b) impressora 3D Ultimaker 2+, em funcionamento<sup>51</sup>.

A bolsa (figura 4.113) destinada ao acondicionamento e transporte do protótipo de *hardware/software* concebido, apresenta dimensões de  $168 \times 190 \times 55$  mm, permitindo, por exemplo, a sua colocação à cabeceira, ou numa cadeira de rodas, após certificação prévia do protótipo e eventuais evoluções futuras.

Figura 4.113: *Kit* de *hardware* do protótipo, na configuração para comunicação através de cabo USB.

<sup>50</sup> <https://www.simplify3d.com/>.

<sup>51</sup> No âmbito dos conceitos da “Indústria 4.0” e da Manufatura Aditiva (AM), foi apresentada recentemente a primeira impressora 3D comercial de Fabrico de Filamento Fundido (FFF), capaz de imprimir cores completas: a impressora *da Vinci Color*, com tecnologia CMYK Inkjet, da “startup” XYZprinting (<https://www.xyzprinting.com/en-US/product/da-vinci-color/>).

Página em branco

## Capítulo 5

# Conclusões

*O essencial não é o que se fez do homem, mas o que ele faz com o que dele foi feito.*

Jean-Paul Sartre (1905 - 1980)

### Sumário

---

5.1	Síntese do trabalho de investigação . . . . .	167
5.2	Perspetivas de desenvolvimento futuro . . . . .	172

---

### Resumo

Este capítulo apresenta, em síntese, as conclusões deste trabalho. São ainda identificados alguns temas de investigação em aberto sobre a integração humano-máquina, sendo apontadas perspetivas para desenvolvimento futuro.

### 5.1 Síntese do trabalho de investigação

No âmbito do trabalho de investigação foram exploradas diversas estruturas de modelos para captar a dinâmica dos sistemas humano-máquina, tendo sido projetados vários controladores de assistência, com o objetivo que os equipamentos e as máquinas possam adaptar-se aos seres humanos e não o contrário.

Tendo em conta a existência de múltiplos modelos associados a bandas de frequências distintas na identificação do comportamento para um mesmo operador humano e sendo estes modelos dependentes da frequência dos sinais de seguimento utilizados, foi desenvolvida uma metodologia de classificação de sinais em termos das suas frequências, testada no capítulo 4 (subsecção 4.2.3). É de referir que, quando se recorre a estruturas neuronais com Linhas de Atraso (TDLs), os resultados de classificação estarão afetados de um tempo de atraso.

Foi investigado o potencial dos métodos de modelagem linear para a identificação de sistemas humano-máquina, tendo sido realizadas diversas experiências de seguimento manual em perseguição, utilizando um manípulo (*joystick*). Verificou-se que os modelos humano-máquina obtidos, dependem ainda do tipo e da forma do sinal de seguimento utilizado, o mesmo sucedendo para o tempo de atraso estimado. Também se verificou que o tempo de atraso para um mesmo operador é

praticamente constante e independente do grau de desempenho ou perícia, podendo, à partida, ser separado para fins de identificação.

Foram introduzidas estratégias de controlo ótimo LQG para a melhoria do desempenho dos sistemas humano-máquina, confirmando-se a existência de multi-modelos na identificação das características do comportamento para um mesmo indivíduo. No entanto, a síntese LQG nem sempre assegurará boas propriedades de robustez face a incertezas no modelo. Estas terão de ser confirmadas separadamente, pelo uso de mecanismos de “*loop-shaping*”, obtendo, por exemplo, os limites de incerteza do modelo.

Foi desenvolvida uma metodologia de modelagem multivariável para sistemas de interação humano-máquina, baseada numa aproximação diagonal no espaço de estados. Esta metodologia encontra-se também associada ao projeto de controladores LQG, permitindo uma melhoria efetiva do desempenho e da proficiência do operador. A abordagem simplificada de modelagem humano-máquina entra em conta com o ganho da resposta em frequência. A metodologia de modelagem proposta permitiu a melhoria do desempenho para as tarefas de seguimento contínuo em ambiente bidimensional, que ocorrem em muitos casos reais, tais como a navegação, a pilotagem e a condução. A quantificação do desempenho operativo para as tarefas de seguimento multidimensionais foi obtida através de diversas medidas de desempenho propostas.

O projeto de controlo em sistemas humano-máquina, envolvendo tarefas de seguimento contínuo, recorreu à modelagem linear. Tendo por base a análise dos resultados experimentais efetuada no capítulo 4 (secções 4.3 e 4.4), pode concluir-se que este tipo de modelagem constitui um método válido para o controlo de sistemas humano-máquina, encontrando-se assim validada a primeira hipótese de investigação formulada no capítulo 1 (subsecção 1.1.2), ou seja, *se forem realizadas tarefas de seguimento, então a modelagem linear é um método exequível para o projeto de sistemas de controlo de assistência ao operador*.

Para os movimentos Ponto-a-Ponto é introduzido um método de classificação baseado no índice de desempenho, tendo sido verificado para tarefas Ponto-a-Ponto realizadas com recurso a uma *pen tablet* e ao protótipo concebido, que os utilizadores humanos que apresentam melhor desempenho cumprem com maior rigor a lei de Fitts, sendo que, em movimentos de alcance rápido, a duração do movimento para alcançar um alvo é simultaneamente dependente da distância ao alvo e da sua largura. A lei de Fitts pode assim, ser utilizada como um estimador do compromisso velocidade-exatidão para os movimentos humanos de alcance rápido.

O desempenho em operações manuais de seguimento contínuo foi analisado através de dois métodos distintos: o método clássico baseado no erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$  e o método que recorre à Análise em Componentes Principais (PCA). O procedimento baseado em PCA assume a existência de correlação entre os sinais da matriz de dados (construída para cada experiência a partir dos dados multidimensionais de entrada e de saída associados ao sistema humano-máquina). De acordo com os resultados experimentais apresentados no capítulo 4 (secção 4.4), a análise PCA possibilita, à partida, uma melhor diferenciação para o desempenho do operador humano, atendendo a que no modelo PCA, que tem por base os dados do operador “especialista”,

todos os dados das experiências são projetados no espaço de pontuações de fatores <sup>1</sup>. Logo, as pequenas variações nos dados originais serão assinaladas com maior projeção no espaço de pontuações de fatores, possibilitando assim uma melhor distinção para as tarefas manuais de seguimento. Por outro lado, as medidas de desempenho baseadas no erro quadrático cartesiano médio  $M_{QE}$  obtido no espaço de dados são, normalmente, mais adequadas para as tarefas de seguimento manual que apresentem menores índices de desempenho e para os operadores não treinados. Os resultados do protótipo foram validados no capítulo 4 (subsubsecção 4.6.2.6), através do modelo de desempenho associado à lei de Fitts, descrito no capítulo 3 (subsecção 3.5.1). A segunda hipótese de investigação, formulada no capítulo 1 (subsecção 1.1.2), fica assim suficientemente demonstrada, ou seja, *se os operadores estiverem treinados, então a análise de Fitts e a Análise em Componentes Principais constituem metodologias válidas para a quantificação do desempenho do sistema humano-máquina*.

São introduzidas novas estratégias para o projeto de sistemas de controlo de assistência, onde a informação disponível é limitada e apenas dependente da observação humana. Neste âmbito, foi desenvolvida uma metodologia baseada num classificador difuso e num esquema de assistência que utiliza os dados reais e a informação adicional correspondente à melhor experiência realizada por um operador/condutor. Uma condição para a transferência de aprendizagem com base na análise de correlação foi também proposta. Tendo em conta a análise dos resultados experimentais, efetuada no capítulo 4 (secção 4.5), ficou comprovada a terceira hipótese de investigação, formulada no capítulo 1 (subsecção 1.1.2), ou seja, *se existir um grau significativo de correlação entre o comportamento dos operadores humanos, então a transferência de aprendizagem é uma técnica alternativa para a síntese operativa de sistemas de controlo de assistência*.

Para a implementação em Tempo-Real do procedimento de transferência de aprendizagem entre operadores humanos foi utilizado um Controlador Proporcional, Integral e Derivado (PID) de comutação de assistência, ajustado através de uma técnica difusa de agrupamento, e implementado através de um microcontrolador com uma arquitetura ARM®.

Foi proposto para a tecnologia assistiva um novo esquema de controlo em cascata, em conjunto com duas Interfaces Humano-Computador concebidas <sup>2</sup>, com o objetivo de melhorar o desempenho e a usabilidade na utilização do cursor através de mãos-livres (capítulo 4, secção 4.6). O *hardware* e o *software*, desenvolvidos no âmbito deste trabalho, permitem a substituição dos dispositivos tradicionais de interface com o computador. Salienta-se também que as técnicas de filtragem de Kalman, de fusão sensorial de Madgwick et al. (2011) e de Mahony et al. (2008), bem como os algoritmos de controlo, foram implementados em *hardware*, possibilitando uma execução em Tempo-Real.

A análise dos diversos resultados experimentais, apresentada no capítulo 4, permite validar as hipóteses de investigação propostas, relativas às subquestões de investigação. É dada uma resposta afirmativa inequívoca à *principal questão de investigação* deste trabalho, introduzida no capítulo 1 (subsecção 1.1.1), ou seja, *o desempenho de um sistema que integra o ser humano pode ser melhorado, se for utilizado um controlador de assistência que tenha em conta o comportamento e*

<sup>1</sup> Também designado na terminologia anglo-saxónica por espaço de *scores*.

<sup>2</sup> Utilizando Visão Computacional (CV) e Sistemas Microeletromecânicos (MEMSs).

as limitações do operador humano e da máquina. Os diversos contributos descritos, associados à validação das hipóteses de investigação, permitem responder às subquestões de investigação respetivas, introduzidas no capítulo 1 (subsecção 1.1.1).

Relativamente à primeira subquestão de investigação, para caracterizar e identificar um sistema de interação com o ser humano podem ser utilizados diversos métodos de modelagem linear, como a identificação ARX, a identificação de função de transferência, a análise da resposta transiente e a identificação pelo método melhorado de análise em frequência. Por sua vez, e relativamente à segunda subquestão de investigação, a análise de Fitts e a Análise em Componentes Principais possibilitam o desenvolvimento de um modelo de análise de desempenho para o sistema humano-máquina, com o operador treinado. Para as tarefas de seguimento, são ainda propostas medidas de desempenho baseadas na exatidão e no esforço, e para os sistemas de acesso ao computador, de mãos livres, são introduzidos os modelos corrente e simplificado de desempenho para tecnologia assistiva.

Quanto à terceira subquestão de investigação identificada neste trabalho, as metodologias adequadas de projeto de controlo para a melhoria do desempenho de um sistema de interação humano-máquina consistem em diversas técnicas de controlo, tendo por base um modelo matemático obtido para esse sistema e o recurso a compensadores de Deslocamento de Fase (PS), a controladores PID com *anti-windup*, a técnicas de controlo ótimo LQG, a arquiteturas de controlo em cascata, à sintonia de controladores através de algoritmos meta-heurísticos inspirados na natureza e, quando a informação disponível é insuficiente para a obtenção de um modelo humano-máquina, a metodologias de projeto de controladores de assistência com base no conceito de transferência de aprendizagem/conhecimento.

A realização em *hardware* com recurso a microcontroladores ARM®, de alguns dos algoritmos de controlo propostos, apresenta carácter inovador face a trabalhos anteriores, referenciados no capítulo 2, possibilitando a implementação de controladores de Tempo-Real, projetados e personalizados à medida das características de cada utilizador humano, nos dispositivos eletrónicos de reduzidas dimensões.

No âmbito das atividades de ciência de projeto e do novo paradigma da “Indústria 4.0” é apresentado um protótipo inovador, concebido neste trabalho, com aplicação em diversas áreas relacionadas com a interação humano-máquina, nomeadamente em tecnologia assistiva. Este sistema de apoio ao utilizador no acesso ao computador utiliza microcontroladores <sup>3</sup> ARM® e uma Unidade de Medição Inercial (IMU) triaxial, com giroscópio, acelerómetro e sensor de temperatura, complementada ainda com um compasso eletrónico (magnetómetro triaxial), um altímetro e um contacto de pressão. O dispositivo HID de pequenas dimensões (figuras 1.4 e 4.91) com retroação por USB ou *Bluetooth*®, que integra um controlador para assistência com *anti-windup*, sintonizado através de uma metodologia de otimização inspirada na natureza, encontra-se concluído. A aplicação de *software* <sup>4</sup> desenvolvida (figuras 1.5, 4.102 e 4.103), efetua a interação com o dispositivo eletrónico de interface, permitindo, com ou sem fios, o acesso ao computador a utilizadores com

---

<sup>3</sup> A programação dos microcontroladores do protótipo de *hardware*, com proteção por “*lock bits*”, implicou a escrita de aproximadamente 9000 linhas de código na linguagem de programação C.

<sup>4</sup> A conceção desta aplicação implicou a escrita de cerca de 3700 linhas de código na linguagem C#.

necessidades especiais.

O trabalho de investigação realizado possibilitou, em súpula, a consolidação do conhecimento da área emergente do controlo humano-máquina com recurso a dispositivos eletrónicos, dentro do âmbito da ciência da cognição, nomeadamente quanto à inovação das teorias, metodologias e dos procedimentos biónicos que envolvem as Interfaces Humano-Máquina, tendo dado origem a diversas contribuições científicas e tecnológicas originais, descritas no capítulo 1 (secção 1.3), designadamente:

- Introduziu-se uma metodologia que simplifica a modelagem, a identificação e o controlo univariável e multivariável de sistemas humano-máquina.
- Foi proposta e desenvolvida uma técnica, para a transferência de aprendizagem entre operadores humanos, sendo introduzida uma condição de transferência de conhecimento entre operadores com base em análise de correlação.
- Foi concebida, desenvolvida e validada uma arquitetura de assistência para utilização em Interfaces Humano-Computador, baseada num esquema de controlo em cascata, que recorre à “intenção” do operador humano.
- Projetou-se e testou-se um protótipo inovador de *hardware/software* com comunicação e retroação por rádio *Bluetooth*<sup>5</sup> de baixa potência de transmissão<sup>5</sup>, ou por cabo USB, provido de um controlador eletrónico integrado, configurado com recurso a um modelo do utilizador humano, que permite melhorar a usabilidade e o desempenho no acesso ao computador a pessoas com necessidades especiais. O dispositivo eletrónico com auto-calibração desenvolvido pode funcionar de modo autónomo, sem fios, sendo ainda dotado de um modo automático de adormecimento na ausência de movimento, para a poupança de energia do microcontrolador ARM<sup>®</sup> do módulo HID e do rádio *Bluetooth*<sup>®</sup> do dispositivo de comunicação mestre.

Fruto do trabalho científico e tecnológico realizado no Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), e com o apoio do Centro de Tecnologias e Sistemas do Instituto de Desenvolvimento de Novas Tecnologias (CTS-Uninova), da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, do Instituto Politécnico de Setúbal (IPSetúbal) e da Escola Superior de Tecnologia de Setúbal (ESTSetúbal), foram publicados no âmbito desta dissertação diversos artigos em revistas, capítulos de livros e conferências (apêndice C).

---

<sup>5</sup> Norma IEEE 802.15.1, classe 2, configurável entre  $-20$  dBm e  $0$  dBm. dBm é a razão de potência em decibéis da potência medida, referenciada a  $1$  miliwatt (mW). Optou-se pela utilização dos módulos RN-42 *Bluetooth*<sup>®</sup> 2.1 com EDR (Taxa de Dados Melhorada), pois estes módulos de comunicação permitem maiores taxas de transferência de dados, comparativamente aos módulos *Bluetooth*<sup>®</sup> de Baixo Consumo de Energia (BLE 4.0).

## 5.2 Perspetivas de desenvolvimento futuro

O trabalho de investigação realizado resultou da combinação de diferentes abordagens e estratégias de modelagem, de identificação e de controlo, que foram aplicadas a diversos sistemas de interação humano-máquina, tendo sido realizadas várias experiências com voluntários humanos.

Para um futuro trabalho, recomenda-se a continuação das abordagens de sintonia de controladores PID através de metodologias de otimização inspiradas na natureza (Fister Jr. et al., 2013). Outros tipos de controladores, como por exemplo os neuro-difusos, poderiam ser projetados. Poderá também ser aferida a possibilidade de projetar um controlador de comutação robusto através do paradigma do “controlo *unfalsified*” (Baldi et al., 2011; Safonov, 1997), capaz de se modificar sempre que os novos dados invalidem o controlador.

Outro aspeto interessante será estender as técnicas de assistência desenvolvidas a outras interfaces, recorrendo à utilização de sensores mioelétricos para controlo gestual, aos sistemas de interação através do olhar (*eye-gaze*) e às Interfaces Cérebro-Computador (BCIs) com ultra alta largura de banda. As técnicas de controlo concebidas, poderão ainda, ser aplicadas futuramente em Interfaces Tácteis de Utilizador (TUIs), na assistência a doenças neuromusculares <sup>6</sup>.

Relativamente ao protótipo de *hardware/software* desenvolvido de acesso ao computador para tecnologia assistiva, parece ter interesse a sua integração em diferentes Sistemas Operativos (OSs) e dispositivos móveis <sup>7</sup>, respeitando as Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo Web (WCAG) e dando ênfase aos teclados virtuais com predição de palavras, para dar mais autonomia aos seus utilizadores, possibilitando o aumento da produtividade e a criação de módulos adaptados <sup>8</sup> para a aprendizagem ativa e o entretenimento. Também será interessante melhorar a calibração “*soft iron*” do compasso, a largura de banda das comunicações e miniaturizar <sup>9</sup> ainda mais o protótipo.

Um estudo comparativo, baseado na lei de Fitts, com outras tecnologias alternativas que permitam o acesso do utilizador ao computador, através do recurso ao tempo de residência (*dwell time*), poderia também ser realizado. O *hardware* e o *software* desenvolvidos neste trabalho para tecnologia assistiva <sup>10</sup> poderão, futuramente, ser aplicados a outras áreas, como a engenharia biomédica, a medicina da reabilitação e do desporto, a fisioterapia e a engenharia das interfaces.

---

<sup>6</sup> Como por exemplo as miopatias, as miastenias, as neuropatias (como a neuropatia sensitivo-motora de Charcot-Marie-Tooth) e a Amiotrofia Espinal (AME). As distrofias musculares de Duchenne e de Becker são miopatias genéticas que ocorrem, na sua grande maioria, em crianças do sexo masculino. A Síndrome de Rett (RTT) é uma desordem neurológica genética, que afeta principalmente as crianças do sexo feminino.

<sup>7</sup> MIT App Inventor (MIT, 2017) é uma ferramenta baseada na *cloud*, que integra um ambiente de programação visual que permite a construção de aplicações (*apps*) para *tablets* e *smartphones*.

<sup>8</sup> As ferramentas Unity®, Blender™, 3DS MAX®, Unreal® Engine e RPG Maker™ possibilitam a criação de módulos educacionais e de jogos adaptados em ambientes de Realidade Virtual (VR) e de Realidade Aumentada (AR). A plataforma Kahoot!™ (Douligeris et al., 2018) potencia a aprendizagem ativa.

<sup>9</sup> Para o desenho em computador e a realização de Placas de Circuito Impresso (PCBs) em tecnologia SMT/BGA, e para a produção rápida de moldes por injeção e de diversas partes em plástico, recomendam-se as páginas *web*: <https://www.kicad-pcb.org/>, <https://www.snapeda.com/home/>, <https://www.oshpark.com/>, <https://www.allpcb.com/>, <https://www.seeedstudio.com/fusion.html>, <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/>, <https://www.tinkercad.com/>, <https://www.protolabs.com/> e <https://www.3dhubs.com/>.

<sup>10</sup> Permitindo a independência na vida de muitas pessoas que precisam. Com este trabalho pretende-se também dar um contributo válido para uma sociedade mais inclusiva e impulsionadora de aprendizagens transformadoras, com sentido humanista.♡



# Apêndice A: Quaterniões de Hamilton

O matemático irlandês William Rowan Hamilton propôs, em 1843, o conceito de quaternião, que denota uma expressão matemática quadrinomial, na qual um termo é designado a sua parte real e os restantes três termos formam um trinómio, denominando-se de parte imaginária, sendo representados na forma:  $x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$ , sendo  $x$ ,  $y$  e  $z$  três coeficientes reais e independentes, normalmente representados pelas três coordenadas retangulares. Um quaternião  $\mathbf{q}$  é um quádruplo (A.1) constituído por um escalar real  $q_0$  e um vetor  $\mathbf{v} = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}$  tridimensional, podendo ser representado por

$$\begin{cases} \mathbf{q} = q_0 + \mathbf{v} = q_0 + q_1\mathbf{i} + q_2\mathbf{j} + q_3\mathbf{k} \\ q_1 = x \\ q_2 = y \\ q_3 = z \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

A teoria dos quaterniões tinha por objetivo definir a relação entre dois vetores, de modo a ser possível a rotação de um vetor noutro, através da multiplicação com um terceiro vetor. Hamilton constatou que tal não podia ser realizado apenas com vetores tridimensionais, sendo necessária uma quarta dimensão. Os quaterniões constituem assim uma extensão  $\mathbb{H}$  dos números complexos  $\mathbb{C}$ . O produto de dois quaterniões genéricos verifica as seguintes regras (A.2), introduzidas em Hamilton (1844).

$$\begin{cases} \mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -1 \\ \mathbf{ij} = \mathbf{k} = -\mathbf{ji} \\ \mathbf{jk} = \mathbf{i} = -\mathbf{kj} \\ \mathbf{ki} = \mathbf{j} = -\mathbf{ik} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Um quaternião (Jia, 2018; Kuipers, 2002) é um número complexo quadridimensional que pode representar a orientação de um corpo rígido no Espaço Tridimensional (3D), sendo essa representação bastante mais concisa e conveniente do que a representação baseada na matriz de rotação. A álgebra de quaterniões tem aplicação em muitas áreas, como por exemplo, a animação 3D, a robótica, a navegação inercial e a mecânica quântica. Quando se utilizam ângulos de Euler ou de Tait-Bryan pode ocorrer o efeito de “*gimbal lock*”. Este fenómeno surge quando se verifica uma inclinação longitudinal de  $\pm \frac{\pi}{2}$  rad, ou seja, quando por exemplo um avião aponta para baixo, ou para cima. Nessa situação, dois dos eixos encontram-se sobrepostos e os seus “*gimbals*” coincidem, o que terá como consequência a perda de um grau de liberdade. Este efeito indesejado é evitado quando se efetuam rotações através da representação em quaterniões (Lam, 2003).

O produto de Hamilton ( $\otimes$ ) entre um quaternião  $\mathbf{p} \in \mathbb{H}$  e um quaternião  $\mathbf{q} \in \mathbb{H}$ , é definido por

$$\mathbf{p} \otimes \mathbf{q} = (p_0 + p_1 \mathbf{i} + p_2 \mathbf{j} + p_3 \mathbf{k}) \otimes (q_0 + q_1 \mathbf{i} + q_2 \mathbf{j} + q_3 \mathbf{k}) \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{p} \otimes \mathbf{q} = & (p_0 q_0 - p_1 q_1 - p_2 q_2 - p_3 q_3) + \\ & + (p_0 q_1 + p_1 q_0 + p_2 q_3 - p_3 q_2) \mathbf{i} + \\ & + (p_0 q_2 - p_1 q_3 + p_2 q_0 + p_3 q_1) \mathbf{j} + \\ & + (p_0 q_3 + p_1 q_2 - p_2 q_1 + p_3 q_0) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Os quaterniões  $\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r} \in \mathbb{H}$  e o escalar  $c \in \mathbb{R}$  verificam

$$\begin{cases} (\mathbf{p} + \mathbf{q}) \otimes \mathbf{r} = \mathbf{p} \otimes \mathbf{r} + \mathbf{q} \otimes \mathbf{r} \\ (\mathbf{p} \otimes \mathbf{q}) \otimes \mathbf{r} = \mathbf{p} \otimes (\mathbf{q} \otimes \mathbf{r}) \\ (c \otimes \mathbf{p}) \otimes \mathbf{q} = c \otimes (\mathbf{p} \otimes \mathbf{q}) = \mathbf{p} \otimes (c \otimes \mathbf{q}) \\ \mathbf{p} \otimes (\mathbf{q} + \mathbf{r}) = \mathbf{p} \otimes \mathbf{q} + \mathbf{p} \otimes \mathbf{r} \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

embora o produto de Hamilton seja não comutativo, porque  $\mathbf{p} \otimes \mathbf{q} \neq \mathbf{q} \otimes \mathbf{p}$ .

Um vetor tridimensional  $\mathbf{v} = 0 + x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$ , também denominado de quaternião puro <sup>1</sup>, pode ser rodado por um quaternião  $\mathbf{q}$  unitário, representado por  $\mathbf{q} = q_0 + q_1 \mathbf{i} + q_2 \mathbf{j} + q_3 \mathbf{k}$  e com  $\|\mathbf{q}\| = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} = 1$ , sendo gerado o vetor tridimensional  $\mathbf{b}$  resultante, através da relação, dada por

$$\begin{cases} \mathbf{b} = \mathbf{q} \otimes \mathbf{v} \otimes \mathbf{q}^* \\ \mathbf{q}^* = q_0 - q_1 \mathbf{i} - q_2 \mathbf{j} - q_3 \mathbf{k} \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

Da qual, de acordo com Lam (2003), resulta

$$\begin{aligned} \mathbf{b} = & (x(q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2) + 2y(q_1 q_2 - q_0 q_3) + 2z(q_0 q_2 + q_1 q_3)) \mathbf{i} + \\ & + (2x(q_0 q_3 + q_1 q_2) + y(q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2) + 2z(q_2 q_3 - q_0 q_1)) \mathbf{j} + \\ & + (2x(q_1 q_3 - q_0 q_2) + 2y(q_0 q_1 + q_2 q_3) + z(q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2)) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Atendendo a que o quaternião  $\mathbf{q}$  é unitário, verifica

$$\begin{cases} -q_2^2 - q_3^2 = -1 + q_0^2 + q_1^2 \\ -q_1^2 - q_3^2 = -1 + q_0^2 + q_2^2 \\ -q_1^2 - q_2^2 = -1 + q_0^2 + q_3^2 \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

Pelo que a orientação descrita pelo quaternião unitário  $\mathbf{q}$  pode ser representada em (A.9), e de acordo com Henderson (1977), através da matriz de rotação  $\mathbf{M}_G$ .

$$\mathbf{M}_G = \begin{bmatrix} 2q_0^2 + 2q_1^2 - 1 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2q_0^2 + 2q_2^2 - 1 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & 2q_0^2 + 2q_3^2 - 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

<sup>1</sup> Porque a sua parte real é nula.

# Apêndice B: Terminologia

## Aprendizagem

**algoritmos meta-heurísticos:** algoritmos heurísticos mais desenvolvidos que recorrem a um compromisso de pesquisa local e aleatoriedade, apresentando normalmente melhores desempenhos (Yang, 2010b). 21, 22, 60, 170

**aprendizagem por reforço:** a aprendizagem de mapear no sentido da maximização dos objetivos que rendem a maior recompensa (Sutton & Barto, 1998). 21

**aprendizagem supervisionada:** a aprendizagem para o mapeamento entre as variáveis de entrada e uma dada variável de saída, prevendo o valor desta para os dados não lidos (Cunningham et al., 2008). 21, 81

**erro:** diferença entre a saída desejada e a saída atual (Dukkipati, 2006). xvii, xx, xxi, xxv, xxxvii–xxxix, xli, xliii, 17, 39, 40, 43, 52, 53, 64, 69, 70, 74, 76, 81, 82, 94, 98, 100, 101, 103, 107, 112, 114, 115, 118, 119, 124, 141, 168, 169, 177

**inteligente-intelegente:** a inteligência natural lê no interior dos problemas as soluções a extrair, enquanto a artificial elege as soluções. Vê-se a diferença essencial destas ideias comparando a concepção psicológica da inteligência humana e a sua emulação pelos métodos da inteligência artificial nas máquinas (Duarte-Ramos, 2002). 1, 7

**mapas auto-organizáveis:** técnica iterativa, baseada em Redes Neurais Artificiais, que permite obter a visualização de relações de similaridade nos dados (Kohonen, 2014). 21

**rede neuronal:** processador massivamente distribuído, constituído por unidades simples de processamento, que possui a propensão natural para armazenar conhecimento experimental (Haykin, 2009). xviii, xix, xxxvii, xxxviii, 29, 34–37, 40, 80–86

**transferência de aprendizagem:** técnica que aborda a problemática de como influenciar o conhecimento adquirido num dado domínio de origem, por forma a melhorar a exatidão e a rapidez de aprendizagem num domínio alvo relacionado (Mihalkova et al., 2007). ix, xlv, xlv, 5, 9, 21, 32, 55–59, 123, 124, 126–128, 134, 135, 138, 169–171

## Controlo humano-máquina

**adaptacia:** adaptação da operação de um sistema à execução das suas funções (Duarte-Ramos, 2015). 7

**compensador:** componente que é introduzido no sistema, por forma a compensar um défice de desempenho (Dukkipati, 2006). xx, xxxix, xl, 51, 52, 87, 92–94, 102, 103, 105

**controlo *unfalsified*:** o paradigma do controlo *unfalsified* exclui controladores de uma dada classe de candidatos, com base na verificação de consistência entre os dados, nas especificações de desempenho e nas leis de controlo (Cabral & Safonov, 2004). 172

**espaço de estados:** representação dos estados característicos em função da variável de estado e da sua variação temporal (ou velocidade de estado) (Duarte-Ramos, 2015). 8, 16, 49, 102, 103, 105, 106, 114, 168

**estabilidade:** propriedade de um sistema definido por uma resposta natural temporal que decai para zero (Dukkipati, 2006). xxv, 54, 63, 94, 105

**perturbações:** sinais não desejados que adulteram a entrada ou a saída de um sistema ou processo (Dukkipati, 2006). 15, 32, 54, 97, 156

**preditor de Smith:** estrutura de controlo que desloca o atraso para fora da malha de realimentação, fazendo com que o controlador possa atuar sobre um processo como se a dinâmica de malha fechada não tivesse atraso (Oliveira, 2016). 16, 44

**processo:** sistema que produz algo utilizável (autónomo ou controlado) (Duarte-Ramos, 2015). xviii, xx–xxii, xxv, xxxv, xl–xlii, 2, 4, 5, 8, 17, 18, 21, 39, 40, 50, 51, 53, 54, 65, 75, 86, 87, 92–95, 97, 98, 100–105, 111–113, 115, 120, 122, 144, 156, 176, 177

**resposta transiente:** a curva da resposta anterior ao estado de equilíbrio em sistemas estáveis (Dukkipati, 2006). 41, 43, 44, 51, 52, 88, 90, 170

**sistema humano-máquina:** sistema no qual as funções do operador e da máquina encontram-se inter-relacionadas, sendo necessárias para a sua operação (Yu, 2008). xvii–xxii, xxv, xl–xliii, 4, 5, 7, 14, 19, 22, 23, 31–33, 40, 41, 45–50, 54–57, 59, 74, 87–89, 92–98, 101, 103, 106–108, 110, 111, 121, 139, 168–170

**transferência:** movimento de matéria ou sinais de um local para outro no mesmo espaço (com ou sem conversão) (Duarte-Ramos, 2015). xviii, xxi, xxii, xxvii, xxxvii, xxxix–xli, xliii, xlv, 9, 13–16, 31, 40–43, 48–52, 55, 56, 58, 59, 89, 97, 103, 107–111, 120, 128, 131, 133, 135, 156–158, 170, 171

## Humano sistêmico

**acuidade:** capacidade para a discriminação de detalhes finos de grande contraste (Frisén, 1980). 65, 69

**cerebelo:** região do cérebro dos vertebrados que torna possível os movimentos coordenados suas (Barlow, 2005). 17, 22

**ciborgues:** incorporam componentes exógenos, estendendo as funções de controlo com autorregulação dos organismos humanos, de modo a se poderem adaptar a novos ambientes (Clynes & Kline, 1960). 29

**cognição:** processo mental do conhecimento pelo uso do cérebro (Duarte-Ramos, 2015). 6, 12, 18–20, 25, 28, 171

**complexidade:** estado funcional sem conhecimento completo, conhecendo-se pelo menos uma das cinco essências sistêmicas (que pode ser indefinida, incompleta, incerta ou indeterminada) (Duarte-Ramos, 2016). 5, 7, 29, 32, 65, 123

**destreza:** processo de manipular um objeto de uma dada configuração de posse para uma outra (Li et al., 1989). ix, 7, 8, 19

**ergonomia:** disciplina científica que se dedica ao estudo dos ambientes de trabalho eficientes e seguros (Brown, 2007). 6

**índice de desempenho:** medida de performance, quantitativa (Dukkipati, 2006). xxiii, xxv, xxvi, xxxvi, xli, xliii, xliv, 43, 65, 67, 69, 71–74, 114, 115, 118, 121, 122, 133–135, 144, 145, 168

**modelo de *Crossover*:** modelo de um sistema humano-máquina, que consiste numa aproximação em torno da frequência de cruzamento (*Crossover*) para ganho unitário, a um tempo de atraso e a um integrador (Levine, 1999). 14, 15

**seguimento manual compensatório:** tarefa manual de seguimento, na qual, somente o erro do sistema é visualizado (Levine, 1999). 15, 16

**seguimento manual em perseguição:** tarefa manual de seguimento, na qual, a saída e o erro do sistema são ambos visualizados (Levine, 1999). 47, 50, 51, 54, 69, 120, 167

**simplexidade:** estado funcional em que se conhece cada essência sistêmica (por ser definida, completa, certa ou determinada) (Duarte-Ramos, 2015). 7

**usabilidade:** a potencialidade de ser usada pelos humanos de forma fácil e eficaz (Shackel, 2009). ix, 9, 11, 24, 139, 146, 169, 171

## Sistemas eletrônicos

**acelerómetro eletrônico:** dispositivo que mede acelerações, sendo a aceleração medida através da geração de impulsos elétricos (Figueiredo et al., 2007). 10, 152, 156, 170

**arquitetura ARM®:** família de microprocessadores RISC de 32 e 64 *bits*, de baixo consumo, utilizada em sistemas embutidos (Emilio, 2015). 169

**arquitetura RISC:** arquitetura de processadores com reduzido número de instruções, que utiliza diversas técnicas de paralelismo com a finalidade de aumentar o desempenho (Oklobdzija, 1999). 10

**eletrocorticograma:** registo dos sinais intracranianos, adquiridos a partir de elétrodos cirurgicamente implantados no espaço subdural do cérebro (Wang et al., 2013). 18

**giroscópio microeletromecânico:** sensor de movimento que deteta e mede o movimento angular de um objeto (Passaro et al., 2017). 10, 152, 156, 170

**interface isométrica:** dispositivo que gera a saída, de acordo com a quantidade sentida de força, sem se mover (Jang & Kim, 2014). 88

**microcontrolador:** pequeno computador constituído por um único chipe, utilizado para o controlo de sistemas embutidos (Axelson, 1997). xvii–xix, 10, 24, 64, 78, 131, 148, 149, 151, 152, 161, 164, 169, 171

**microprocessador:** circuito eletrónico integrado, capaz de executar uma série de instruções armazenadas em memória, bem como a escrita dos resultados para a memória (McFarland, 2006). 25

**sensores mioelétricos:** pequenos elétrodos utilizados à superfície ou no interior do músculo, com o objetivo de detetar e transmitir os potenciais elétricos gerados pelas células musculares (EMG). Podem, por exemplo, ser utilizados para transmitir esses sinais para uma mão biónica (Pasquina et al., 2015). 139, 172

**sistemas de navegação inercial:** sistemas que utilizam as diversas propriedades inerciais de sensores montados a bordo de veículos, para a execução das funções de navegação (Britting, 1971). 11

**sistemas embutidos:** dispositivos de computação integrados, normalmente dedicados para o controlo em Tempo-Real de processos e máquinas (Emilio, 2015). 6, 178

**telemetria:** tecnologia que possibilita a medição remota, o controlo e o relato de informação (Cho & Hyo, 2011). 6, 9

## Tecnologia assistiva

**alargamento do ecrã:** permite ao utilizador com fraca visão ver mais facilmente o ecrã do computador (Cook & Polgar, 2015). 27

**biónica:** substituição ou melhoria de órgãos ou de outras partes do corpo por versões eletromecânicas, combinando elementos naturais e sintéticos (Robitaille, 2010). 3, 25, 178

**computação vestível:** estudo ou prática de inventar, projetar, construir ou utilizar dispositivos computacionais e sensores miniaturizados de colocação corporal (Mann, 2012). 25, 27

***dwell time*:** tempo de aceitação ou residência durante o qual o utilizador faz uma pausa na seleção por um período de tempo predeterminado, ajustável. No final deste tempo de aceitação, o dispositivo executará automaticamente qualquer função que fora selecionada, como por exemplo, clicar (Cook & Polgar, 2015). 27, 58, 131, 153, 154, 172

**esquemas de cor:** permite às pessoas que não conseguem distinguir cores, ou que possuem fraca visão, ver mais facilmente o ecrã do computador (Cook & Polgar, 2015). 27

***eye-gaze*:** sistema de interface contendo uma câmara montada debaixo do monitor do computador, focada no olho do utilizador. A câmara determina para onde o utilizador está a olhar, sendo por exemplo o cursor colocado no ponto do olhar (Robitaille, 2010). 27, 172

**predição de palavras:** aumento da velocidade da entrada de texto, destinado às pessoas que não são capazes de utilizar as mãos para escrever num teclado (Cook & Polgar, 2015). 27, 172

**quaterniões:** quádruplos, que constituem representações mais sucintas do que as matrizes de rotação (Jia, 2018). xxxv, 11, 151, 173, 174

**rastreamento facial:** permite controlar o cursor do computador sem a utilização das mãos (Cook & Polgar, 2015). xxii, 27, 140, 141, 143

**reconhecimento cerebral:** possibilita a um utilizador humano, sem recurso às suas mãos, comandar um computador através do pensamento (Cook & Polgar, 2015). 27

***sip-and-puff*:** sensor pneumático ativado pela respiração, através de uma ligeira aspiração ou assopro (Robitaille, 2010). 3, 27, 141

**teclado virtual:** entrada de texto para aqueles que não conseguem utilizar as suas mãos num teclado normal (Cook & Polgar, 2015). xxiii, xxvi, xlii, 10, 27, 73, 144, 146, 147












**tecnologia assistiva:** qualquer item, equipamento ou produto, comercial ou não, modificado ou adaptado, que é usado para aumentar, manter ou melhorar as capacidades funcionais de uma pessoa com necessidades especiais (Robitaille, 2010). ix, xix, xxv, xlii, 2, 3, 6, 9, 11, 25–27, 72, 73, 77, 122, 139, 161, 164, 169, 170, 172

Página em branco



# Apêndice C: Lista de publicações

















## C.1 Publicações em revistas

- Antunes RA, Palma LB, Coito FV, Duarte-Ramos H (2017) A fuzzy approach towards inductive transfer and human-machine interface control design. Adaptive Intelligent Systems for Learning, Control and Optimization, Evolving Systems 8:1–14, 2017, Springer Nature, Switzerland.  
DOI: 10.1007/s12530-016-9172-6  
Indexado em:  WoS  Scopus  DBLP  WorldCat  Crossref.
- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2013b) Skill Evaluation in Point-to-Point Human-Machine Operation. Mechatronics, Applied Mechanics and Energy Engineering - Mechatronics and Automation, Applied Mechanics and Materials 394:463–469, 2013, Trans Tech Publications, Zurich-Durten.  
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.394.463  
Indexado em:  Scopus  WorldCat  Crossref.
- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2013a) A Multi-Variable Modeling Approach for Improving Operator Proficiency. International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences 7(3):238–246, 2013, North Atlantic University Union, USA. ISSN: 1998-0140  
Indexado em:  Scopus  WorldCat.
- Antunes RA, Coito FV (2008) A Cognitive Model for Frequency Signal Classification<sup>1</sup>. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering 2(7):1374–1379, 2008, World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET).  
PISSN: 2010-376X  
EISSN: 2010-3778  
Indexado em:  EBSCO.











---

<sup>1</sup> Artigo também apresentado na 5<sup>th</sup> International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP 2008), Heidelberg, Germany.

## C.2 Publicações em capítulos de livros <sup>2</sup>

- Palma LB, Antunes RA, Brito VS, Gil PS (2017) PSO-PCA Optimization Approach for Control Design. Em: Focus on Swarm Intelligence Research and Applications, pp 177–192. Nova Science Publishers.  
ISBN: 978-1-53612-452-1  
Indexado em:  Scopus.
- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2012) Improving Operator Performance through the Use of a Multivariable Human-Machine Control Strategy. Em: Technological Innovation for Value Creation, IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 372, pp 95–104. Springer Nature.  
DOI: 10.1007/978-3-642-28255-3\_11  
Indexado em:  WoS  Scopus  DBLP  WorldCat  Crossref.
- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2011) A Linear Approach towards Modeling Human Behavior. Em: Technological Innovation for Sustainability, IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 349, pp 305–314. Springer Nature.  
DOI: 10.1007/978-3-642-19170-1\_33  
Indexado em:  WoS  Scopus  DBLP  WorldCat  Crossref.
- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2010b) Using Human Dynamics to Improve Operator Performance. Em: Emerging Trends in Technological Innovation, IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 314, pp 393–400. Springer Nature.  
DOI: 10.1007/978-3-642-11628-5\_43  
Indexado em:  WoS  Scopus  DBLP  WorldCat  Crossref.

## C.3 Publicações em conferências



- Antunes RA, Palma LB, Coito FV, Duarte-Ramos H, Gil P (2016) Intelligent Human-Computer Interface for Improving Pointing Device Usability and Performance. Em: 12<sup>th</sup> IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA 2016), Kathmandu, Nepal, pp 714–719.  
DOI: 10.1109/ICCA.2016.7505363  
Indexado em:  WoS  Scopus  DBLP  WorldCat  Crossref.
- Antunes RA, Palma LB, Coito FV, Duarte-Ramos H (2015) Inductive Transfer Assist-Control for Human-Interface Steering Device. Em: IEEE International Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS 2015), Douai, France, pp 1–8.  
DOI: 10.1109/EAIS.2015.7368795  
Indexado em:  WoS  Scopus  DBLP  WorldCat  Crossref.

<sup>2</sup> Artigos publicados em IFIP, Advances in Information and Communication Technology, também apresentados nas edições de 2010, 2011 e 2012 da Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems (DoCEIS), Lisbon, Portugal.

- Antunes RA, Palma LB, Coito FV, Duarte-Ramos H (2014) Performance analysis of HMI system based on PCA. Em: IEEE, 7<sup>th</sup> International Conference on Human System Interaction (HSI 2014), Lisbon, Portugal, pp 118–122.  
DOI: 10.1109/HSI.2014.6860459  
Indexado em:  WoS  Scopus  EBSCO  WorldCat  Crossref.
- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2010a) Human-Machine Control Model Approach to Enhance Operator Skills. Em: IEEE, 2<sup>nd</sup> International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2010), Singapore, pp 403–407.  
DOI: 10.1109/ICMET.2010.5598392  
Indexado em:  Scopus  WorldCat  Crossref.

QR ORCID®



**Rui Azevedo Antunes** (, ) é docente no Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Escola Superior de Tecnologia de Setúbal do Instituto Politécnico de Setúbal (IPSetúbal) e colaborador no Centro de Tecnologias e Sistemas do Instituto de Desenvolvimento de Novas Tecnologias (CTS-Uninova). ORCID® ID: 0000-0003-3341-1386, ResearcherID™: P-3621-2015, Scopus® Author ID: 57065798800, Authenticus i AuthID: R-002-4DK.

Página em branco

# Apêndice D: Índice remissivo

*Num.*

1D (Espaço Unidimensional) 65, 87, 92, 108  
 2D (Espaço Bidimensional) .xlii, 49, 67–71,  
 101, 109, 112, 118, 119  
 3D (Espaço Tridimensional) vii, 3, 9, 49, 63,  
 68, 71, 89, 139, 151–153, 164, 165,  
 172, 173

**A**

AAC (*Augmentative and Alternative Communication*) ..... 3  
 ABCA (Algoritmo de Colônia Artificial de Abelhas) ..... 22  
 ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) 164  
 acelerômetro ..... 10, 152, 156, 170, 178  
 acelerador .. xlii, xlv, 56, 59, 123, 131, 135  
 ACO (Otimização por Colônia de Formigas) 21  
 ADCs (Conversores Analógicos-Digitais) 131  
 AHRS (Sistema de Referência de Atitude e Rumor) ..... 9, 11, 150–152, 156  
 alvo ..... xxxvi, xxxvii, xlii, xliii, 7, 40, 50, 65–70, 72–74, 82, 83, 103–105, 112–120, 122, 139–141, 143, 144, 160, 162, 168, 175  
 AM (Manufatura Aditiva) ..... 29, 164  
 AME (Amiotrofia Espinal) ..... 172  
 amostragem xxxv, 37–39, 43, 48, 53, 54, 60, 70, 81, 84, 88, 91, 93, 94, 100, 112, 116, 125, 131, 141, 143  
 amplitude 33, 46, 47, 75, 81, 86, 91, 93–95,

105, 109, 110

ANN (Rede Neuronal Artificial) .... xxxvii, 34–36, 41, 80, 83, 84, 86  
 AR (Realidade Aumentada) .... 3, 28, 172  
 ARM® (Máquina Avançada com Conjunto Restrito de Instruções) . 10, 24, 63, 131, 138, 141, 164, 169–171  
 ARMAs (Modelos Auto-Regressivos de Média Móvel) ..... 16  
 ARX (Modelo Auto-Regressivo com Entradas Exógenas) xxxix, xli, xlii, 21, 23, 32, 39, 43, 44, 87, 89, 90, 142, 144, 157, 161, 170

**B**

BA (Algoritmo Inspirado na Ecolocalização Utilizada Pelos Morcegos) ..... 22  
 BBO (Otimização Baseada em Biogeografia) ..... 22  
 BCI (Interface Cérebro-Computador) .. 2, 3, 26  
 BFOA (Algoritmo de Otimização do Forrageamento das Bactérias) .. 21  
 BGA (*Ball Grid Array*) ..... 172  
 BLE (*Bluetooth*® de Baixo Consumo de Energia) ..... 171  
 BT (*Bluetooth*®) .... 9, 11, 77, 78, 132, 141, 147–151, 153, 164, 170, 171

**C**

centroides ..... 58–60, 129, 130  
 cirurgia laparoscópica ..... 25

classificação . 33, 37, 38, 40, 41, 79–81, 85,  
86, 97, 138, 167, 168  
COE (Centro de Excelência) ..... 19  
condutor . 15, 124–131, 133–135, 137, 138,  
169  
controlo em cascata .. 9, 141, 158, 169–171  
controlo supervisionado ..... 32  
convolução ..... xxxv, 42  
correlação .. xlv, 5, 9, 56, 57, 119, 124–126,  
138, 168, 169, 171  
covariância ..... 74, 75, 144  
CPE (Co-Poliéster) ..... 164  
CSA (Algoritmo da Reprodução dos  
Pássaros Cuco) ..... 22  
cursor xliii, 9–11, 27, 67, 68, 139–141, 144,  
146, 147, 151, 153, 154, 156, 158,  
160, 161, 169, 179  
CV (Visão Computacional) .. 142, 147, 169

## D

DAQ (Sistema de Aquisição de Dados) .. 78  
DASs (Sistemas de Assistência ao  
Condutor) ..... 2, 8  
DC (Corrente Contínua) ..... 11  
DDBSFM (Modelos de Retroação de  
Estados com Base em Dados  
Discretos) ..... 21  
declinação magnética ..... 152  
deformação xxxviii, xli, xlii, 70, 71, 98, 100,  
133  
dente de serra ..... 84, 86  
DFT (Transformada Discreta de Fourier) 96  
distribuição normal ..... 92, 135, 137, 138  
DIY (Faça Você Mesmo) ..... 9  
DTI (Imagem por Tensor de Difusão) ... 29  
duplo integrador ..... 92

## E

EDR (Taxa de Dados Melhorada) ..... 171  
EEG (Eletroencefalografia) ... 2, 3, 26, 139  
EEPROM (Memória Programável Apagável  
Apenas de Leitura) ..... 11, 152

EKF (Filtro de Kalman Estendido) ..... 44  
ELA (Esclerose Lateral Amiotrófica) ..... 9  
EM (Esclerose Múltipla) ..... 9  
EMG (Eletromiografia) ..... 178  
EPP (Exatidão Melhorada do Ponteiro) 157,  
158, 160  
ERICA (*Eye-gaze Response Interface  
Computer Aid*) ..... 2, 3  
escravo ..... 11, 147–151  
esforço . ix, xxxviii, 3, 7, 29, 54, 58, 59, 65,  
69–71, 94, 97, 98, 100, 105, 111,  
113, 130, 133, 134, 151  
especialista .. 56, 59, 63, 74, 123, 129, 135,  
138, 160, 162, 168  
estabilidade ..... 54, 63, 94, 105, 176  
estimador ..... 16, 54, 55, 59, 97, 168  
exatidão xxxvi, 4, 15, 22, 65, 66, 69–71, 98,  
100, 105, 113, 121, 122, 168, 175  
excentricidade ..... 105

## F

F1 (Fórmula 1) ..... 57, 125, 129, 131, 133  
FA (Algoritmo dos Pirlampos) ... xlii, xliii,  
11, 22, 60–63, 159, 161, 162  
fase . xxxviii, xl, 24, 46, 51, 52, 92, 94, 102,  
125, 144  
FCM (Algoritmo Difuso de *c*-Médias) . xlv,  
xlv, 57, 59, 60, 128, 129, 135, 138  
FFF (Fabrico de Filamento Fundido) 9, 164,  
165  
FHCI (Interação Facial  
Humano-Computador) 3, 139, 140,  
142, 143, 146  
FIR (Resposta ao Impulso Finita) ..... 35  
FPA (Algoritmos Inspirados na Polinização  
de Flores) ..... 22  
FPGAs (*Field-Programmable Gate Arrays*)  
24, 63

## G

ganho estático .. 41, 46, 93, 94, 96, 103, 157  
GAs (Algoritmos Genéticos) ..... 21

GBS (Algoritmo de Procura Baseado em Galáxias) ..... 22  
giroscópio ..... 10, 152, 156, 170, 178  
GNU (*GNU's Not Unix*) ..... 87  
GPS (Sistema de Posicionamento Global) 28  
grau de pertença ..... xlv, 57  
GUI (Interface Gráfica do Utilizador) ... 66, 67, 157

## H

HAM (Mecatrónica Adaptada ao Humano) 19–22, 56, 65  
HBP (Projeto Cérebro Humano) ..... 28, 29  
HCI (Interface Humano-Computador) 9, 11, 139, 151  
HID (Dispositivo de Interface Humana) xliii, 6, 9–11, 140, 141, 148–158, 160, 161, 164, 170, 171  
HMI (Interface Humano-Máquina) ... 9, 20, 56, 58, 59, 71, 74, 93, 102, 131, 133, 141, 183  
HMMs (Modelos Ocultos de Markov) ... 23  
homúnculo motor ..... 164  
HPI (Índice de Desempenho do Operador Humano) ..... 66, 162  
HRA (Avaliação da Confiabilidade Humana) ..... 22  
HS (Algoritmo de Busca Harmónica) ... 22  
HSO (Operador com Alto Desempenho) 116, 119, 122  
HuIL (Humano Integrado no Anel) 7–9, 40, 95, 98, 123, 138

## I

IPC (Circuito Inter-integrado) ..... 149  
ICA (Algoritmo de Competição Imperialista) ..... 22  
ICSP (Programação Série no Circuito) .. 64  
ICSs (Sistemas Inteligentes de Treino) ... 2  
IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) ..... 6, 63, 64

IMU (Unidade de Medição Inercial) 10, 26, 151–153, 170  
instável 8, 40, 83, 92–95, 98, 102–104, 112, 113, 121  
IT (Tecnologia da Informação) ..... 6  
IWD (Algoritmo de Gotas de Água Inteligentes) ..... 22

## K

KF (Filtro de Kalman) ..... 43, 143, 151

## L

LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) 6, 50, 78, 87, 93, 97, 101, 103, 111, 112  
LCD (*Display* de Cristal Líquido) ..... 131  
LED (Díodo Emissor de Luz) ..... 88  
lei de Fitts .. 65–69, 72, 121, 122, 163, 168, 169, 172  
limites de incerteza ..... 55, 100, 114, 168  
LMS (Mínimos Quadrados Médios) . 40, 41  
LPF (Filtro Passa-Baixo) xxxvii, 43, 53, 81, 89, 130  
LQ (Linear Quadrático) ..... xl, 54, 111  
LQE (Estimador Linear Quadrático) .... 54  
LQG (Linear Quadrático Gaussiano) xl, 16, 54, 97, 168  
LQR (Regulador Linear Quadrático) .... 54  
LS (Mínimos Quadrados) ..... 40, 43, 157  
LSO (Operador com Baixo Desempenho) 116, 119, 122  
LTI (Linear Invariante no Tempo) ... 32, 33, 41, 42, 44–46, 50, 63, 90, 92, 101

## M

método de discretização ... 53, 97, 111, 143  
MA (Algoritmo Memético) ..... 21  
magnetómetro . 10, 150–153, 156, 161, 170  
manípulo . xxxix, xlii, 5, 87–90, 95, 98, 100, 101, 103, 112, 114, 115, 141, 167  
manipulação inversa ... 47, 49, 92, 97, 101, 106, 108

- margens de estabilidade ..... 94  
 MCU (Unidade de Microcontrolador) ... 53  
 MEMSs (Sistemas Microeletromecânicos)  
     10, 169  
 mestre ..... vii, 11, 147–151, 171  
 MIMO (Multi-Entradas, Multi-Saídas) .. 48,  
     50, 55, 101–103, 106, 108–111  
 MoCap (Captura de Movimento) ..... 25  
 MOCMs (Modelos Modificados de Controlo  
     Ótimo) ..... 21  
 MOSAIC (Controlo por Identificação e  
     Seleção) ..... 17, 60  
 movimento voluntário ..... 22  
 movimentos involuntários ..... 156  
 MPU (Unidade de Microprocessador) ... 53  
 MSO (Operador com Médio Desempenho)  
     116, 119, 122  
  
*N*  
 NIRS (Espectroscopia de Infravermelho  
     Próximo) ..... 18  
 NP (Normas Portuguesas) ..... 12  
  
*O*  
 OCM (Modelo de Controlo Ótimo) ..... 16  
 OCR (Reconhecimento Ótico de Caracteres)  
     27, 28  
 OLED (Díodo Emissor de Luz Orgânico) . 3  
 OpenCV (Biblioteca de *Software* Livre de  
     Visão Computacional) .... 79, 140  
 OS (Sistema Operativo) ... 12, 25, 157, 160  
  
*P*  
 PC (Componentes Principais) xxxvi, 74–76,  
     114, 118, 119  
 PCA (Análise em Componentes Principais)  
     xxxv, xxxvi, xli, 5, 63, 73–76,  
     114–116, 118, 119, 168, 170, 183  
 PCB (Placa de Circuito Impresso) ... 63, 78  
 PCR (Regressão de Componentes  
     Principais) ..... 73  
 PD (Controlador Proporcional e Derivado)  
     156, 157  
 PE (Educador de Desempenho) ..... 19  
 pedais ..... 5, 123–125, 130, 131  
 perícia .. 19, 22, 64, 65, 100, 114, 119, 135,  
     138, 139, 168  
 período ... xxxv, 29, 37, 50, 53, 54, 60, 106,  
     112, 131, 143, 179  
 perito ..... 74, 105, 116, 118, 119  
 PI (Controlador Proporcional e Integral) 58,  
     59, 130  
 PID (Controlador Proporcional, Integral e  
     Derivado) xxxviii, xxxix, xliii, xliv,  
     14, 21, 52, 53, 58, 59, 63, 128–130,  
     133, 138, 141–145, 147, 158–162,  
     164, 169, 170, 172  
 PLA (Poliácido Láctico) ..... 9, 151, 164  
 PLS (Mínimos Quadrados Parciais) ..... 73  
 PnP (*Plug and Play*) ..... 10, 153  
 preditor ..... 16, 17, 39, 44, 122, 176  
 protótipo xliii, 5, 6, 9–12, 77, 147, 149–151,  
     153, 155, 160–165, 168–172  
 PS (Deslocamento de Fase) ... xxxix, xl, 52,  
     170  
 PSO (Otimização por Enxame de Partículas)  
     21  
 PTP (Ponto-a-Ponto) ..... xxxvi, xlii, 5, 63,  
     65–69, 72, 73, 79, 101, 120–122,  
     139, 142–144, 146, 156, 160–162,  
     168  
 PWM (Modulador de Largura de Impulso)  
     144  
  
*R*  
 resíduos ..... 126, 128  
 RISC (Computador com Conjunto Restrito  
     de Instruções) ..... 10, 178  
 robustez ..... 55, 100, 114, 168  
 RPG (Jogo de Interpretação de Papéis) . 172  
 RT (Tempo-Real) ... 10, 11, 56, 59, 64, 123,  
     132, 138, 140, 152, 169, 170, 178



- RTT (Síndrome de Rett) ..... 9, 172
- S*
- SAC (Controlo Adaptativo Focado no Desempenho) ..... 23, 24
- SBCs (Computadores de Placa Única) .. 24, 63
- SCRC (*Simulated Car Racing Championship*) ..... 123
- sem fios . 3, 9, 11, 25, 26, 77, 132, 140, 141, 170, 171
- SiP (*System in Package*) ..... 156
- SISO (Uma Entrada e Uma Saída) .. 50, 51, 54, 70, 71, 92
- SMD (Dispositivo de Montagem Superficial) ..... 141
- SMT (Tecnologia de Montagem Superficial) 172
- SOA (Algoritmo de Otimização Espiral) . 22
- SPI (Interface Série de Periféricos) ..... 64
- SPP (Perfil de Porta Série) . 11, 77, 132, 141
- SSO (Otimização por Aranhas Sociais) .. 22
- STC (Síndrome do Túnel do Carpo) ..... 9
- STL (*Stereolithography*) ..... 150, 151, 164
- SVD (Decomposição em Valores Singulares) ..... 75
- T*
- TDLs (Linhas de Atraso) ..... 79, 86, 167
- ToF (Tempo-de-Voo) ..... 3
- travão .. xlv, xlv, 56, 59, 123, 131, 135, 137
- treino supervisionado ..... 40
- TTL (Lógica Transístor-Transístor) .... 148
- TUIs (Interfaces Tácteis de Utilizador) . 172
- U*
- unimodal ..... 92, 97
- USB (Barramento Universal Série) ... 9, 11, 64, 77, 132, 147–149, 151, 153, 160, 165, 170, 171
- V*
- valores singulares ..... xxxvi, 75, 76, 118
- vetores singulares ..... xxxvi, 75
- VI (Instrumento Virtual) . 78, 103, 112, 115
- visão com dinâmica distorcida ..... 19
- volante .... xlv, xlv, 5, 56, 58, 59, 123–125, 127, 129–131, 133, 135, 138
- VR (Realidade Virtual) ..... 3, 11, 172
- VSMs (Modelos de Controlo de Estratégia Variável) ..... 21
- W*
- WBAN (*Wireless Body Area Networks*) . 25
- WCAG (Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo Web) ..... 172
- Z*
- ZOH (Retentor de Amostras de Ordem Zero) ..... 97, 111

Página em branco

# Bibliografia

- Abdel-Malek A, Marmarelis V (1988) Modeling of task-dependent characteristics of human operator dynamics pursuit manual tracking. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 18(1):163–172.
- Accot J, Zhai S (2003) Refining fitts' law models for bivariate pointing. Em: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '03)*, Fort Lauderdale, USA, pp 193–200.
- Agarwal P, Mehta S (2014) Nature-inspired algorithms: State-of-art, problems and prospects. *International Journal of Computer Applications* 100(14):14–21.
- Agarwal S, Singh AP, Anand N (2013) Evaluation performance study of firefly algorithm, particle swarm optimization and artificial bee colony algorithm for non-linear mathematical optimization functions. Em: *IEEE Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies*, Tiruchengode, India, pp 1–8.
- Ahmadi K, Salari E (2017) Social-spider optimised particle filtering for tracking of targets with discontinuous measurement data. *IET Computer Vision* 11(3):246–254.
- Ahn JW, Ku Y, Kim DY, Sohn J, Kim J, Kim HC (2018) Wearable in-the-ear EEG system for ssvep-based brain–computer interface. *Electronics Letters* 54(7):413–414.
- Alves J, Vourvopoulos A, Bernardino A, Bermúdez IBS (2016) Eye gaze correlates of motor impairment in VR observation of motor actions. *Methods of Information in Medicine* 55(1):79–83.
- Antunes RA, Palma LB, Coito FV, Duarte-Ramos H (2014) Performance analysis of HMI system based on PCA. Em: *IEEE, 7<sup>th</sup> International Conference on Human System Interaction (HSI 2014)*, Lisbon, Portugal, pp 118–122.
- Antunes RA, Palma LB, Coito FV, Duarte-Ramos H, Gil P (2016) Intelligent human-computer interface for improving pointing device usability and performance. Em: *12<sup>th</sup> IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA 2016)*, Kathmandu, Nepal, pp 714–719.
- Antunes RA, Coito FV (2008) A cognitive model for frequency signal classification. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering* 2(7):1374–1379.
- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2010a) Human-machine control model approach to enhance operator skills. Em: *IEEE, 2<sup>nd</sup> International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2010)*, Singapore, pp 403–407.
- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2010b) Using Human Dynamics to Improve Operator Performance. Em: *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol 314, pp 393–400. Springer Nature.

- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2011) A Linear Approach towards Modeling Human Behavior. Em: IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 349, pp 305–314. Springer Nature.
- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2012) Improving Operator Performance through the Use of a Multivariable Human-Machine Control Strategy. Em: IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 372, pp 95–104. Springer Nature.
- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2013a) A multi-variable modeling approach for improving operator proficiency. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* 7(3):238–246.
- Antunes RA, Coito FV, Duarte-Ramos H (2013b) Skill evaluation in point-to-point human-machine operation. *Applied Mechanics and Materials* 394:463–469.
- Antunes RA, Palma LB, Coito FV, Duarte-Ramos H (2015) Inductive transfer assist-control for human-interface steering device. Em: IEEE International Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS 2015), Douai, France, pp 1–8.
- Antunes RA, Palma LB, Coito FV, Duarte-Ramos H (2017) A fuzzy approach towards inductive transfer and human-machine interface control design. *Evolving Systems* 8:1–14.
- APCC (2017) Associação de Paralisia Cerebral de Coimbra. <http://www.apc-coimbra.org.pt/>. Acesso em 26 de Outubro de 2018.
- Asahi Kasei (2013) AK8963 3-axis Electronic Compass. <https://www.akm.com/akm/en/file/datasheet/AK8963C.pdf>. Acesso em 26 de Outubro de 2018.
- Åström KJ, Hägglund T (1988) Automatic Tuning of PID Controllers. Instrument Society of America.
- Åström KJ, Wittenmark B (1997) Computer-Controlled Systems: Theory and Design. Information and System Sciences Series, Prentice Hall.
- Ataş M (2017) Hand tremor based biometric recognition using leap motion device. *IEEE Access* PP(99):1–9.
- Axelsson J (1997) The Microcontroller Idea Book: Circuits, Programs & Applications Featuring the 8052-BASIC Microcontroller. Lakeview Research.
- Baldi S, Battistelli G, Mosca E, Tesi P (2011) Multi-model unfalsified adaptive switching control: Test functionals for stability and performance. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 25(7):593–612.
- Bargmann C, Newsome W, Anderson D, Brown E, Deisseroth K, Donoghue J, MacLeish P, Marder E, Normann R, Sanes J, Schnitzer M, Sejnowski T, Tank D, Tsien R, Ugurbil K, Hudson K, Ling G, Wingfield J, Peña C, Jorgenson L (2014) Brain research through advancing innovative neurotechnologies (BRAIN®) working group report to the advisory committee to the director. Relatório técnico, National Institutes of Health.
- Barlow J (2005) The Cerebellum and Adaptive Control. Cambridge University Press.
- Baron S, Kleinman DL (1969) The human as an optimal controller and information processor. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems* 10(1):9–17.

- Baziuk PA, Leod JENM, Rivera SS (2018) Human reliability analysis based on human abilities theory model. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 26(2):443–453.
- Bazrafkan S, Kar A, Costache C (2015) Eye gaze for consumer electronics: Controlling and commanding intelligent systems.. *IEEE Consumer Electronics Magazine* 4(4):65–71.
- Bechet F, Ogawa K, Sariyildiz E, Ohnishi K (2015) Electrohydraulic transmission system for minimally invasive robotics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62(12):7643–7654.
- Benalcázar ME, Jaramillo AG, Jonathan, Zea A, Páez A, Andaluz VH (2017) Hand gesture recognition using machine learning and the myo armband. Em: 2017 25<sup>th</sup> European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Kos, Greece, pp 1040–1044.
- Bendjeghaba O, Boushaki S, Zemmour N (2013) Firefly algorithm for optimal tuning of PID controller parameters. Em: 4<sup>th</sup> International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Istanbul, Turkey, pp 1293–1296.
- Bezdek JC, Ehrlich R, Full W (1984) FCM: The fuzzy *c*-means clustering algorithm. *Computers & Geosciences* 10(2-3):191–203.
- Bharucha-Reid A (1997) *Elements of the Theory of Markov Processes and Their Applications*. Dover books on mathematics, Dover Publications.
- Bhushan B, Pillai SS (2013) Particle swarm optimization and firefly algorithm: Performance analysis. Em: 2013 3<sup>rd</sup> IEEE International Advance Computing Conference, Ghaziabad, India, pp 746–751.
- Bishop RH (2012) *Modern Control Systems With LabVIEW*. National Technology and Science Press.
- Biswas S, Gogoi AK (2014) Design and simulation of piezoresistive mems accelerometer for the detection of pathological tremor. Em: IEEE SOUTHEASTCON 2014, Lexington, USA, pp 1–5.
- Bitter R, Mohiuddin T, Nawrocki M (2007) *LabVIEW Advanced Programming Techniques*. CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Blum J (2013) *Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry*. John Wiley & Sons.
- Boer E, Kenyon R (1998) Estimation of time-varying delay time in nonstationary linear systems: An approach to monitor human operator adaptation in manual tracking tasks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 28(1):89–99.
- Bortolami S, Duda K, Borer N (2010) Markov analysis of human-in-the-loop system performance. Em: 2010 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, pp 1–9.
- Brauer JR (2014) Hall Effect and Magnetoresistive Sensors. Em: pp 177–199. *Magnetic Actuators and Sensors*, IEEE.
- Brito VS (2016) Fault Tolerant Control of a X8-VB Quadcopter. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Nova de Lisboa. [https://run.unl.pt/bitstream/10362/20249/1/Brito\\_2016.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/20249/1/Brito_2016.pdf). Acesso em 26 de Outubro de 2018.
- Britting KR (1971) *Inertial Navigation Systems Analysis*. John Wiley & Sons Inc.
- Brown B (2007) *A Guide to Programming in Java*. Lawrenceville Press, Inc., Lawrenceville, USA.

- Butt AH, Rovini E, Dolciotti C, Bongioanni P, Petris GD, Cavallo F (2017) Leap motion evaluation for assessment of upper limb motor skills in parkinson's disease. Em: 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), London, UK, pp 116–121.
- Butz MV, Lönneker TD (2009) Optimized sensory-motor couplings plus strategy extensions for the TORCS car racing challenge. Em: 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, Milano, Italy, pp 317–324.
- Cabral FB, Safonov MG (2004) Unfalsified model reference adaptive control using the ellipsoid algorithm. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 18(8):683–696.
- Calignano F, Manfredi D, Ambrosio EP, Biamino S, Lombardi M, Atzeni E, Salmi A, Minetola P, Iuliano L, Fino P (2017) Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE* 105(4):593–612.
- Cardamone L, Loiacono D, Lanzi PL (2009) Learning drivers for TORCS through imitation using supervised methods. Em: 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, Milan, Italy, pp 148–155.
- Carlson T, del R. Millan J (2013) Brain-Controlled Wheelchairs: A Robotic Architecture. *IEEE Robotics Automation Magazine* 20(1):65–73.
- Caruso MJ (2000) Applications of magnetic sensors for low cost compass systems. Em: IEEE Position Location and Navigation Symposium, San Diego, USA, pp 177–184.
- Caruso MJ (1997) Application of magnetoresistive sensors in navigation systems. Em: *Sensors and Actuators*, SAE SP-1220, Detroit, USA, pp 15–21.
- Celik O, Ertugrul S (2010) Predictive human operator model to be utilized as a controller using linear, neuro-fuzzy and fuzzy-ARX modeling techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23(4):595–603.
- Cha Y, Myung R (2013) Extended fitts' law for 3D pointing tasks using 3D target arrangements. *International Journal of Industrial Ergonomics* 43(4):350–355.
- Chao A, Athans M (1999) Stability Robustness to Unstructured Uncertainty for Linear Time Invariant Systems. Em: pp 519–535. *The Control Handbook*, CRC Press.
- Chapman SJ (2008) *Essentials of MATLAB Programming*. Cengage Learning.
- Chen Z, Wang Y, Liu H (2018) Unobtrusive sensor-based occupancy facing direction detection and tracking using advanced machine learning algorithms. *IEEE Sensors Journal* 18(15):6360–6368.
- Cheung Y, Peng Q (2015) Eye gaze tracking with a web camera in a desktop environment. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 45(4):419–430.
- Chiang L, Russell E, Braatz R (2001) *Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems*. Springer-Verlag.
- Chiu S (1994) Fuzzy model identification based on cluster estimation. *Journal of Intelligent Fuzzy Systems* 2:267–278.
- Cho JH, Hyo S (2011) Communication strategies for various types of swallowable telemetry capsules. Em: Krejcar O (ed) *Modern Telemetry*. InTech.

- Chu NN (2018) Wearable sensors for brain EEG signal oriented applications. Em: 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, USA, pp 1–1.
- Cichosz P, Pawełczak Ł (2014) Imitation learning of car driving skills with decision trees and random forests. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 24(3):579–597.
- Clynes ME, Kline NS (1960) *Cyborgs and space*. Astronautics.
- Cook AM, Polgar JM (2015) *Assistive Technologies: Principles and Practice*. Elsevier.
- Csapo AB, Nagy H, Kristjánsson A, Wersényi G (2016) Evaluation of human-myo gesture control capabilities in continuous search and select operations. Em: 7<sup>th</sup> IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), Wrocław, Poland, pp 415–420.
- Cunningham P, Cord M, Delany S (2008) Supervised learning. Em: *Machine Learning Techniques for Multimedia*, pp 21–49. Cognitive Technologies, Springer Berlin Heidelberg.
- Dawson-Howe K (2014) *A Practical Introduction to Computer Vision with OpenCV*. Wiley Publishing.
- Demuth H, Beale M (1998) *Neural network toolbox for use with MATLAB*. MathWorks.
- Dilberoglu UM, Gharehpapagh B, Yaman U, Dolen M (2017) The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 11:545–554, 27<sup>th</sup> International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, Modena, Italy.
- Douligeris C, Seralidou E, Gkotsiopoulos P (2018) Let's learn with kahoot!. Em: 2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Santa Cruz de Tenerife, Spain, pp 677–685.
- Duarte-Ramos H (2002) Inteligência humana e inteligência tecnológica. *Revista Electricidade* Mar.-Abr.(393):63–68.
- Duarte-Ramos H (2014) Tackling foundations of systemic complexity on reality and decision systems. Em: 9<sup>th</sup> Congress of the EUS-UES, Globalization and Crisis. Complexity and governance of systems, Valencia, Spain.
- Duarte-Ramos H (2015) *Iniciética*. Edição de autor.
- Duarte-Ramos H (2016) *Artes liberais*. Edição de autor.
- Dukkipati RV (2006) *Analysis and Design of Control Systems Using MATLAB*. New Age International.
- Dunn JC (1974) A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters. *Cybernetics and Systems* 3(3):32–57.
- Emilio MDP (2015) *Embedded Systems Design for High-Speed Data Acquisition and Control*. Springer.
- Escobar PF, Falcone T (eds) (2014) *Atlas of Single-Port, Laparoscopic, and Robotic Surgery*. Springer.
- Evans M, Noble J, Hochenbaum J (2013) *Arduino in Action*. Manning.
- EyeTribe (2014) Eye tracking 101. <http://www.theeyetribe.com/dev.theeyetribe.com/dev.theeyetribe.com/general/index.html>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.

- Feng G (2010) Analysis and Synthesis of Fuzzy Control Systems: A Model-Based Approach. Automation and Control Engineering, CRC Press.
- Figueiredo LJ, Gafaniz AR, Lopes GS, Pereira R (2007) Aplicações de acelerómetros, instrumentação e aquisição de sinais, monografia. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Fister Jr. I, Xin-She Y, Fister I, Brest J, Fister D (2013) A brief review of nature-inspired algorithms for optimization. *Elektrotehniški vestnik* 80(3):1–7.
- Fitts PM (1992) The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology: General* 121(3):262–269.
- Fontanelli GA, Selvaggio M, Buonocore LR, Ficuciello F, Villani L, Siciliano B (2018) A new laparoscopic tool with in-hand rolling capabilities for needle reorientation. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3(3):2354–2361.
- Frisén L (1980) The neurology of visual acuity. *Brain* 103(3):639–670.
- Fu J (2016) Parallax scrolling interface research based on fitts' law. Em: 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, China, pp 1370–1374.
- Fukushima S, Nozaki T, Ohnishi K (2016) Development of haptic prosthetic hand for realization of intuitive operation. Em: 42<sup>nd</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2016), Florence, Italy, pp 6403–6408.
- Furuta K (2003) Control of pendulum: from Super Mechano-System to Human Adaptive Mechatronics. Em: 42<sup>nd</sup> IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii USA, vol 2, pp 1498–1507.
- Gaetani F, Zappatore GA, Visconti P, Primiceri P (2018) Design of an arduino-based platform interfaced by bluetooth low energy with myo armband for controlling an under-actuated trans-radial prosthesis. Em: 2018 International Conference on IC Design Technology (ICICDT), Otranto, Italy, pp 185–188.
- Gaines B (1969) Linear and nonlinear models of the human controller. *International Journal of Man-Machine Studies* 1(4):333–360.
- Gamboa H, Silva H, Fred A (2014) Himotion: a new research resource for the study of behavior, cognition, and emotion. *Multimedia Tools and Applications* 73(1):345–375.
- Gay W (2014) Mastering the Raspberry Pi. Apress.
- Gips J, Zhang M, Anderson D (2015) Towards a Google Glass Based Head Control Communication System for People with Disabilities. Em: HCI International 2015, Communications in Computer and Information Science, vol 529, pp 399–404. Springer.
- Goldstein EB (2002) Sensation and Perception. Wadsworth Publishing.
- Gray W (ed) (2007) Integrated Models of Cognitive Systems. Oxford Series on Cognitive Models and Architectures, Oxford University Press.
- Gupta H, Kumar AA (2016) The braille interface. Em: IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information Communication Technology (RTEICT), Bengaluru, India, pp 217–220.



- Haavisto O, Remes A (2010) Data-based skill evaluation of human operators in process industry. Em: International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2010), Gyeonggi-Do, South Korea, pp 707–712.
- Habib MK (2008) Human Adaptive and Friendly Mechatronics (HAFM). Em: IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2008), Takamatsu, Japan, pp 61–65.
- Hamilton WR (1844) On Quaternions, or on a New System of Imaginaries in Algebra. *Philosophical Magazine* 25(3):489–495.
- Han C, Im C (2018) EEG-based brain-computer interface for real-time communication of patients in completely locked-in state. Em: 2018 6<sup>th</sup> International Conference on Brain-Computer Interface (BCI), GangWon, South Korea, pp 1–2.
- Harashima F, Suzuki S (2006) Human adaptive mechatronics - interaction and intelligence. Em: 9<sup>th</sup> IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'06), Istanbul, Turkey, pp 1–8.
- Harashima F, Suzuki S (2008) Future of mechatronics and human. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration* 1(1):18–25.
- Harris N (2017) The design and development of assistive technology. *IEEE Potentials* 36(1):24–28.
- Harris R, Iavecchia HP, Dick AO (1989) The Human Operator Simulator (HOS-IV). Em: McMillan GR, Beevis D, Salas E, Strub MH, Sutton R, Breda LV (eds) *Applications of Human Performance Models to System Design*, vol 2, pp 275–282. Springer, Boston.
- Haruno M, Wolpert DM, Kawato MM (2001) MOSAIC model for sensorimotor learning and control. *Neural Computation* 13(10):2201–2220.
- Havlikova M, Jirgl M, Bradac Z (2015) Human reliability in man-machine systems. *Procedia Engineering* 100:1207–1214.
- Haykin S (2009) *Neural Networks and Learning Machines*. Prentice Hall.
- Henderson DM (1977) Euler angles, quaternions, and transformation matrices - working relationships. Relatório técnico, NASA Johnson Space Center; Houston, TX, United States, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770024290.pdf>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Hespanha J, Liberzon D, Stephen Morse A, Anderson B, Brinsmead TS, De Bruyne F (2001) Multiple model adaptive control. part 2: switching. *International journal of robust and nonlinear control* 11(5):479–496.
- Hisham AB, Ishak MHI, Rahim RA, Idris NH (2015) Study of human driving skill in expected and guided conditions. *Jurnal Teknologi* 73(6):139–146.
- Huang S, Wensman JP, Ferris DP (2016) Locomotor adaptation by transtibial amputees walking with an experimental powered prosthesis under continuous myoelectric control. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 24(5):573–581.
- Hunt BR, Lipsman RL, Rosenberg JM (2006) *A Guide to MATLAB for Beginners and Experienced Users*. Cambridge University Press.

- Imamizu H, Miyauchi S, Tamada T, Sasaki Y, Takino R, Pütz B, Yoshioka T, Kawato M (2000) Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. *Nature* 403(6766):192–5.
- Ito M (2000) Internal model visualized. *Nature* 403(6766):153–4.
- Jackson G (1969) A method for the direct measurement of crossover model parameters. *IEEE Transactions on Man Machine Systems* MMS-10(1):27–33.
- Jackson JE (1991) *A User's Guide to Principal Components*. Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley & Sons, Hoboken, USA.
- Jang Bg, Kim GJ (2014) Evaluation of grounded isometric interface for whole-body navigation in virtual environments. *Comput. Animat. Virtual Worlds* 25(5-6):561–575.
- Jia YB (2018) Quaternions. Iowa State University of Science and Technology. <http://web.cs.iastate.edu/~cs577/handouts/quaternion.pdf>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Jiang L, Zhang J, Allen G (2010) Transferred correlation learning: An incremental scheme for neural network ensembles. Em: *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Barcelona, Spain, pp 1–8.
- Jirgl M, Havlikova M, Bradac Z (2015) The dynamic pilot behavioral models. *Procedia Engineering* 100:1192–1197.
- Jolliffe IT (2010) *Principal Component Analysis*. Springer Series in Statistics, Springer.
- Kalman RE, Bucy RS (1961) New results in linear filtering and prediction theory. *Transactions of the ASME. Series D, Journal of Basic Engineering* 83:95–107.
- Kalman RE (1960) A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering* 82(Series D):35–45.
- Kaongoen N, Jo S (2018) An auditory p300-based brain-computer interface using ear-EEG. Em: *2018 6<sup>th</sup> International Conference on Brain-Computer Interface (BCI)*, GangWon, South Korea, pp 1–4.
- Katal N, Kumar P, Narayan S (2014) Optimal PID controller for coupled-tank liquid-level control system using bat algorithm. Em: *International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES)*, Allahabad, India, pp 1–4.
- Kawala-Janik A, Podpora M, Gardecki A, Czuczvara W, Baranowski J, Bauer W (2015) Game controller based on biomedical signals. Em: *20<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, Miedzyzdroje, Poland, pp 934–939.
- Kawato M (1999) Internal models for motor control and trajectory planning. *Current opinion in neurobiology* 9(6):718–27.
- Kawato M (2009) Cerebellum: Models. Em: *Encyclopedia of Neuroscience*, pp 757–767. Elsevier.
- Khemane F, Malti Rachid R, Moreau X (2010) Identification of driver's dynamics via fractional model : set membership approach for a visual feedback. Em: *The 4<sup>th</sup> IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications (FDA'10)*, Badajoz, Spain, pp 1–7.

- Kim HJ, Lee YS, Kim D (2017) Arm motion estimation algorithm using myo armband. Em: 2017 First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), Taichung, Taiwan, pp 376–381.
- Kim Y, Kwak N, Lee S (2018) Classification of motor imagery for ear-EEG based brain-computer interface. Em: 2018 6<sup>th</sup> International Conference on Brain-Computer Interface (BCI), Gangwon, South Korea, pp 1–2.
- Kleinman D, Perkins T (1974) Modeling human performance in a time-varying anti-aircraft tracking loop. *IEEE Transactions on Automatic Control* AC-19(4):297–306.
- Kobayashi H, Ohyama Y, Hashimoto H, She Jh (2006) Manipulation of human behavior by distorted dynamics vision. Em: SICE-ICASE International Joint Conference (SICE-ICCAS2006), Busan, South Korea, pp 4446–4450. <https://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE01995007/>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Kohonen T (2014) *MATLAB Implementations and Applications of the Self-Organizing Map*. Unigrafia Oy, Helsinki, Finland.
- Kok M, Hol J, Schön T (2014) An optimization-based approach to human body motion capture using inertial sensors. Em: Proceedings of the 19<sup>th</sup> IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, vol 19 | Part 1, pp 79–85.
- Kolodko J, Suzuki S, Harashima F (2005) Eye-gaze tracking: An approach to pupil tracking targeted to FPGAs. Em: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), Edmonton, Canada, pp 344–349.
- Kuipers J (2002) *Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace, and Virtual Reality*. Princeton paperbacks, Princeton University Press.
- Kumanan D, Nagaraj B (2013) Tuning of proportional integral derivative controller based on firefly algorithm. *Systems Science & Control Engineering* 1(1):52–56.
- Kun AL (2018) *Human-Machine Interaction for Vehicles: Review and Outlook*. now Publishers.
- Lam T (2003) Hamilton's quaternions. Em: Hazewinkel M (ed) *Handbook of Algebra*, vol 3, pp 429–454. Elsevier.
- Langbridge J (2015) *Arduino Sketches: Tools and Techniques for Programming Wizardry*. Wiley.
- Lawrence PJ, Rogers GJ (1979) Sequential transfer-function synthesis from measured data. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 126(1):104–106.
- Leigh S, Agrawal H, Maes P (2018) Robotic symbionts: Interweaving human and machine actions. *IEEE Pervasive Computing* 17(2):34–43.
- Levine W (1999) *The Control Handbook*. Electrical Engineering Handbook, CRC Press.
- Levine W (2010) *The Control Handbook*. Electrical Engineering Handbook, CRC Press, 2<sup>a</sup> edição.
- Li R, Lai DTH, Lee W (2017) A survey on biofeedback and actuation in wireless body area networks (wban). *IEEE Reviews in Biomedical Engineering* PP(99):1–1.
- Li T, Chang SJ, Chen YX (2003) Implementation of human-like driving skills by autonomous fuzzy behavior control on an FPGA-based car-like mobile robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 50(5):867–880.

- Li W, Sadigh D, Sastry SS, Seshia SA (2014) Synthesis for human-in-the-loop control systems. Em: Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems, Lecture Notes in Computer Science, vol 8413, pp 470–484. Springer Berlin Heidelberg.
- Li Y, Yu T (2015) EEG-based hybrid BCIs and their applications. Em: 3<sup>rd</sup> International Winter Conference on Brain-Computer Interface (BCI), Sabuk, South Korea, pp 1–4.
- Li Z, Canny J, Sastry S (1989) On motion planning for dexterous manipulation, part i. the problem formulation. Em: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, USA, vol 2, pp 775–780.
- Liberzon D (2003) Switching in Systems and Control. Systems & control, Birkhäuser.
- Liu Y, Noguchi N, Ishii K (2014) Development of a Low-cost IMU by Using Sensor Fusion for Attitude Angle Estimation. IFAC Proceedings Volumes V47(V3):4435–4440, 19<sup>th</sup> IFAC World Congress, Cape Town, South Africa.
- Liu Z, Luo Y, Cordero J, Zhao N, Shen Y (2016) Finger-eye: A wearable text reading assistive system for the blind and visually impaired. Em: IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), Angkor Wat, Cambodia, pp 123–128.
- Ljung L (1998) System Identification: Theory for the User. Pearson Education.
- Lone M, Cooke A (2014) Review of pilot models used in aircraft flight dynamics. Aerospace Science and Technology 34:55–74.
- Lopes P, Vale A, Ventura R (2016) Human machine interface to manually drive rhombic like vehicles such as transport casks in ITER\*. IFAC-PapersOnLine 49(15):248–253, 9<sup>th</sup> IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV 2016), Leipzig, Germany.
- López A, Arevalo P, Ferrero F, Valledor M, Campo J (2014) EOG-based system for mouse control. Em: 2014 IEEE SENSORS, Valencia, Spain, pp 1264–1267.
- Lovell J, Kluger J (2000) Apollo 13. Houghton Mifflin.
- Lupu RG, Bozomitu RG, Păsărică A, Rotariu C (2017) Eye tracking user interface for internet access used in assistive technology. Em: 2017 E-Health and Bioengineering Conference (EHB), Sinaia, Romania, pp 659–662.
- Lusa (2018) Israelita OrCam entra em Portugal com solução para pessoas com visão reduzida (RTP NOTÍCIAS ECONOMIA). [https://www.rtp.pt/noticias/economia/israelita-orkam-entra-em-portugal-com-solucao-para-pessoas-com-visao-reduzida\\_n1084800](https://www.rtp.pt/noticias/economia/israelita-orkam-entra-em-portugal-com-solucao-para-pessoas-com-visao-reduzida_n1084800). Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- LusoVU (2015) what is eyespeak? how does it work?. <http://www.myeyespeak.com/eyespeak/>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Macadam CC (2003) Understanding and modeling the human driver. Vehicle System Dynamics 40(1-3):101–134.
- Machado IP, Gomes AL, Gamboa H, Paixão V, Costa RM (2015) Human activity data discovery from triaxial accelerometer sensor: Non-supervised learning sensitivity to feature extraction parametrization. Information Processing & Management 51(2):204–214.

- MacKenzie IS, Buxton W (1992) Extending fitts' law to two-dimensional tasks. Em: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '92), New York, USA, pp 219–226.
- Madgwick SOH (2010) An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. [https://www.samba.org/tridge/UAV/madgwick\\_internal\\_report.pdf](https://www.samba.org/tridge/UAV/madgwick_internal_report.pdf). Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Madgwick SOH, Harrison AJL, Vaidyanathan R (2011) Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. Em: 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Zurich, Switzerland, pp 1–7.
- Mahony R, Hamel T, Pfimlin J (2008) Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. *IEEE Transactions on Automatic Control* 53(5):1203–1218.
- Mahony R, Hamel T, Pfimlin JM (2005) Complementary filter design on the special orthogonal group  $SO(3)$ . Em: Proceedings of the 44<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control, Seville, Spain, pp 1477–1484.
- Mann S (2012) Wearable computing. The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, Interaction Design Foundation. <https://www.interaction-design.org/literature/book/the-encyclopedia-of-human-computer-interaction-2nd-ed/wearable-computing/>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Mann S (2015) Phenomenal augmented reality: Advancing technology for the future of humanity. *IEEE Consumer Electronics Magazine* 4(4):92–97.
- March ST, Smith GF (1995) Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems* 15(4):251–266.
- Margolis M (2011) *Arduino Cookbook*. O'Reilly Media.
- MathWorks® (2018) Simulink Support for Embedded Hardware. <https://www.mathworks.com/discovery/simulink-embedded-hardware/>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- McFarland G (2006) *Microprocessor Design: A Practical Guide from Design Planning to Manufacturing*. Professional Engineering, McGraw-Hill.
- McRuer D (1980) Human dynamics in man-machine systems. *Automatica* 16(3):237–253.
- McRuer DT, Graham D, Krendel ES, Reisener Jr W (1965) Human pilot dynamics in compensatory systems. theory, models and experiments with controlled element and forcing function variations. Wright-Patterson AFB(OH): Air Force Flight Dynamics Laboratory AFFDL-TR 65-15.
- McRuer DT, Jex HR (1967) A review of quasi-linear pilot models. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics* HFE-8(3):231–249.
- Meboldt M, Klahn C (2018) Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017. Springer.
- Mendez I, Hansen BW, Grabow CM, Smedegaard E JL, Skogberg NB, Uth XJ, Bruhn A, Geng B, Kamavuako EN (2017) Evaluation of the myo armband for the classification of hand motions. Em: 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), London, UK, pp 1211–1214.

- Miall RC, Weir DJ, Wolpert DM, Stein JF (1993) Is the cerebellum a smith predictor?. *Journal of motor behavior* 25 3:203–16.
- Mihalkova L, Huynh T, Mooney RJ (2007) Mapping and revising markov logic networks for transfer learning. Em: *Proceedings of the Twenty-Second Conference on Artificial Intelligence (AAAI-07)*, Vancouver, Canada, vol 1, pp 608–614.
- MIT (2017) Anyone Can Build Apps That Impact the World. <http://www.appinventor.mit.edu/explore/>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Moler C (2004) *Numerical Computing with MATLAB*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Moler C (2011) *Experiments with MATLAB*. MathWorks, Inc.
- Molloy D (2014) *Exploring BeagleBone: Tools and Techniques for Building with Embedded Linux*. John Wiley & Sons.
- Monk S (2013) *Programming Arduino Next Steps: Going Further with Sketches*. McGraw-Hill Education.
- Morales DO, Hera PL, Westerberg S, Freidovich LB, Shiriaev AS (2015) Path-constrained motion analysis: An algorithm to understand human performance on hydraulic manipulators. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 45(2):187–199.
- Mosca E (1995) *Optimal, Predictive, and Adaptive Control*. Prentice Hall Information and System Sciences Series, Prentice Hall.
- Muñoz J, Gutierrez G, Sanchis A (2010) A human-like TORCS controller for the simulated car racing championship. Em: *Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games*, Copenhagen, Denmark, pp 473–480.
- Murata A, Uetsugi R, Fukunaga D (2014) Effects of target shape and display location on pointing performance by eye-gaze input system. Em: *Proceedings of the SICE Annual Conference*, Sapporo, Japan, pp 955–962.
- Nozaki T, Murakami T, Shimono T, Ohnishi K, Oboe R (2016) Development of meal assistance device for patients with spinal cord injury. Em: *IEEE 14<sup>th</sup> International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, Auckland, New Zealand, pp 388–393.
- O’Brien F (2010) *The Apollo Guidance Computer: Architecture and Operation*. Springer Praxis Books, Praxis.
- Ogata K (2010) *Modern Control Engineering*. Instrumentation and controls series, Prentice Hall.
- Oishi MMK, Mitchell IM, Van der Loos HFM (eds) (2010) *Design and Use of Assistive Technology*. Springer New York.
- Oklobdzija VG (1999) *Reduced Instruction Set Computers*, Berkeley, CA 94708.
- Okuda H, Takeuchi H, Inagaki S, Suzuki T (2009) Identification of human skill based on feed-forward / feedback switched dynamical model. Em: *ICROS-SICE International Joint Conference (ICCAS-SICE 2009)*, Fukuoka, Japan, pp 235–240.

- Oliveira F (2016) Controle PI/PID Robusto Baseado no Preditor de Smith. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1316M.PDF>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Ovaskainen H, Uusitalo J, Väättäin K (2004) Characteristics and significance of a harvester operators' working technique in thinnings. *International Journal of Forest Engineering* 15(2):67–77.
- Palma LB, Coito FV, Gil PS (2012) Low order models for human controller - mouse interface. Em: 2012 IEEE 16<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES), Lisbon, Portugal, pp 515–520.
- Palma LB, Coito FV, Gil PS, Neves-Silva R (2010) Process control based on PCA models. Em: 15<sup>th</sup> IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2010), Bilbao, Spain, pp 1–4.
- Palma LB, Coito FV, Neves-Silva R (2005) Diagnosis of parametric faults based on identification and statistical methods. Em: 44<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference (CDC-ECC'05), Seville, Spain, pp 3838–3843.
- Palma LB, Antunes RA, Brito VS, Gil PS (2017) PSO-PCA Optimization Approach for Control Design. Em: pp 177–192. *Focus on Swarm Intelligence Research and Applications, Computer Science, Technology and Applications*, Nova Science Publishers.
- Palmroth L, Tervo K, Putkonen A (2009) Intelligent coaching of mobile working machine operators. Em: 13<sup>th</sup> IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES 2009), Barbados, pp 149–154.
- Pan SJ, Yang Q (2010) A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 22(10):1345–1359.
- Parthornratt T, Parkin RM, Jackson M (2011) Human performance index (HPI)-a generic performance indicator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering* 225(6):721–734.
- Pasquina PF, Evangelista M, Carvalho A, Lockhart J, Griffin S, Nanos G, McKay P, Hansen M, Ipsen D, Vandersea J, Butkus J, Miller M, Murphy I, Hankin D (2015) First-in-man demonstration of a fully implanted myoelectric sensors system to control an advanced electromechanical prosthetic hand. *Journal of Neuroscience Methods* 244:85–93.
- Passaro VMN, Cuccovillo A, Vaiani L, De Carlo M, Campanella CE (2017) Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective. *Sensors* 17(10):2284.
- Penfield W, Boldrey E (1937) Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain* 60(4):389–443.
- Pietilä J, Haavisto O (2010) Comparison of operator performance in a mineral processing plant. Em: 2010 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC), Istanbul, Turkey, pp 2773–2779.
- Ponce-Cruz P, Ramírez-Figueroa FD (2009) *Intelligent Control Systems with LabVIEW*. Springer.
- Ponraj G, Ren H (2018) Sensor fusion of leap motion controller and flex sensors using kalman filter for human finger tracking. *IEEE Sensors Journal* 18(5):2042–2049.

- Pool DM, Zaal PMT, Damveld HJ, van Paassen MM, Mulder M (2009) Pilot equalization in manual control of aircraft dynamics. Em: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC2009), San Antonio, USA, pp 2480–2485.
- Potter JJ, Singhose W (2013) Improving manual tracking of systems with oscillatory dynamics. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 43(1):46–57.
- Quha (2016) Quha sento mp multipurpose contactless puff switch. <http://www.quha.com/products-2/quha-sento-mp/>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Ragazzini JR (1948) Engineering aspects of the human being as a servo-mechanism. Em: Proceedings of the Meeting of the American Psychological Association, Boston, USA.
- Rashid H, Al-Mamun A, Robin M, Ahasan M, Reza S (2016) Bilingual wearable assistive technology for visually impaired persons. Em: International Conference on Medical Engineering, Health Informatics and Technology (MediTec), Dhaka, Bangladesh, pp 1–6.
- Rasmussen J, Pejtersen A, Goodstein L (1994) Cognitive systems engineering. Wiley Series in Systems Engineering and Management, Wiley.
- Rawat S, Vats S, Kumar P (2016) Evaluating and exploring the myo armband. Em: 2016 International Conference System Modeling Advancement in Research Trends (SMART), Moradabad, India, pp 115–120.
- Razali N, Shamsudin N, Azid N, Hadi A, Ismail A (2012) A comparison of normality tests using spss, sas and MINITAB: An application to health related quality of life data. Em: International Conference on Statistics in Science, Business, and Engineering (ICSSBE), Langkawi, Malaysia, pp 1–6.
- Reas C, Fry B, Maeda J (2007) Processing: A Programming Handbook for Visual Designers and Artists. MIT Press.
- Redwood B, Schöffner F, Garret B, Fadell (2018) The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications. 3D HUBS.
- Revett K (2008) Behavioral Biometrics: A Remote Access Approach. Wiley Publishing.
- Riviere CN, Thakor NV (1996) Modeling and canceling tremor in human-machine interfaces. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 15(3):29–36.
- Robitaille S (2010) The Illustrated Guide to Assistive Technology and Devices: Tools and Gadgets for Living Independently. Demos Medical Publishing.
- Rukslin, Haddin M, Suprajitno A (2016) Pitch angle controller design on the wind turbine with permanent magnet synchronous generator (pmsg) base on firefly algorithms (FA). Em: 2016 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (ISemantic), Semarang, Indonesia, pp 13–17.
- Safonov M (1997) The unfalsified control concept and learning. *IEEE Transactions on Automatic Control* 42(6):843–847.
- Samejima K, Katagiri K, Doya K, Kawato M (2006) Symbolization and imitation learning of motion sequence using competitive modules. *Electronics and Communications in Japan (Part III: Fundamental Electronic Science)* 89(9):42–53.



- Sasaki T, Takeya A, Igarashi H, Suzuki S (2007) Operation skill quantification for mobile vehicle operation. Em: SICE Annual Conference 2007 (SICE2007), Takamatsu, Japan, pp 274–279.
- Shackel B (2009) Usability - context, framework, definition, design and evaluation. *Interacting with Computers* 21(5-6):339–346.
- Sheridan TB, Ferrell WR (1975) *Man-machine Systems: Information, Control and Decision Models of Human Performance*. MIT Press.
- Shiffman D (2009) *Learning Processing: A Beginner's Guide to Programming Images, Animation, and Interaction*. The Morgan Kaufmann Series in Interactive 3D Technology, Elsevier Science.
- Shilov A (2016) Oculus VR reveals retail price of its virtual reality headset: \$599. <http://www.anandtech.com/show/9921/>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Shinners SM (1974) Modeling of human operator performance utilizing time series analysis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-4(5):446–458.
- Silva IN, Spatti DH, Flauzino RA, Liboni LHB, Alves SFR (2017) *Artificial Neural Networks A Practical Course*. Springer.
- Smid P (2007) *CNC Programming Handbook: A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming*. Industrial Press.
- Söderström T, Stoica P (1989) *System Identification*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA.
- Spüler M (2015) A brain-computer interface (BCI) system to use arbitrary windows applications by directly controlling mouse and keyboard. Em: 37<sup>th</sup> Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Milan, Italy, pp 1087–1090.
- Starner T (2015) *Wearable Computing: Meeting the Challenge*. Em: pp 13–30. *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*, CRC Press.
- Sutton RS, Barto AG (1998) *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT Press.
- Suzuki S (2010) Human adaptive mechatronics skill acquisition in machine manipulation. *IEEE Industrial Electronics Magazine* 4(2):28–35.
- Suzuki S, Furuta K, Harashima F (2005a) Overview of human adaptive mechatronics and assist-control to enhance human's proficiency. Em: *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2005)*, Gyeonggi-Do, South Korea, pp 1759–1764.
- Suzuki S, Harashima F (2005) Human adaptive mechatronics. Em: *IEEE 9<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES 2005)*, Mediterranean Sea, pp 11–16.
- Suzuki S, Harashima F (2008) Analysis of machine operation skills using hand discrete movement. Em: *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2008)*, Seoul, South Korea, pp 156–163.
- Suzuki S, Harashima F, Furuta K (2005b) Skill analysis of human in machine operation. Em: *International Conference on Neural Networks and Brain (ICNN B '05)*, Beijing, China, vol 3, pp 1556–1561.
- Suzuki S, Harashima F, Kurihara K (2006) Assist control and its tuning method for haptic system. Em: *9<sup>th</sup> IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'06)*, Istanbul, Turkey, pp 374–379.

- Suzuki S, Kobayashi H, Harashima F (2007) Brain monitoring analysis of skill on voluntary motion. Em: International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2007), Seoul, South Korea, pp 1178–1182.
- Suzuki S, Tomomatsu N, Harashima F, Furuta K (2004) Skill evaluation based on state-transition model for human adaptive mechatronics (HAM). Em: 30<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2004), Busan, South Korea, vol 1, pp 641–646.
- Suzuki S, Harashima F (2012) Estimation algorithm of machine operational intention by bayes filtering with self-organizing map. *Advances in Human-Computer Interaction* 2012:1–20.
- Suzuki S, Igarashi H, Kobayashi H, Yasuda T, Harashima F (2013) Human adaptive mechatronics and human-system modelling. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10:1–14, <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.5772/55740/>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- TDK InvenSense® (2016) MPU-9250 Product Specification Revision 1.1. <http://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- TDK InvenSense® (2018) MPU-9250 Nine-Axis (Gyro + Accelerometer + Compass) MEMS MotionTracking® Devices. <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250/>. Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- TE Connectivity (2017) MS5637-02BA03 Low Voltage Barometric Pressure Sensor. Measurement Specialties. [http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FMS5637-02BA03%7FB4%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_DS\\_MS5637-02BA03\\_B4.pdf%7FCAT-BLPS0037/](http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FMS5637-02BA03%7FB4%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_MS5637-02BA03_B4.pdf%7FCAT-BLPS0037/). Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Tervo K (2010a) Discrete data-based state feedback model of human operator. Em: IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA), Qingdao, China, pp 202–207.
- Tervo K (2010b) Human Adaptive Mechatronics Methods for Mobile Working Machines. Dissertação de Doutorado, Aalto University.
- Tervo K (2014) Adaptation of the human-machine interface to the human skill and dynamic characteristics. Em: 19<sup>th</sup> IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, pp 3539–3544.
- Tervo K, Bocca M, Eriksson L, Manninen A (2010a) Wireless manual control for human adaptive mechatronics. *International Journal of Advanced Mechatronic Systems* 2(4):254–270.
- Tervo K, Koivo H (2010) Towards human skill adaptive manual control. *International Journal of Advanced Mechatronic Systems* 2(1/2):46–58.
- Tervo K, Palmroth L, Koivo H (2010b) Skill evaluation of human operators in partly automated mobile working machines. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 7(1):133–142.
- Tervo K, Manninen A (2010) Analysis of model orders in human dynamics identification using linear polynomial and hammerstein-wiener structures. Em: IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2010), Chicago, USA, pp 614–620.
- Teshome AK, Kibret B, Lai D (2018) A review of implant communication technology in WBAN : progresses and challenges. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering* pp 1–1.

- Tung JY, Lulic T, Gonzalez DA, Tran J, Dickerson CR, Roy EA (2015) Evaluation of a portable markerless finger position capture device: accuracy of the leap motion controller in healthy adults. *Physiological Measurement* 36(5):1025–1035.
- Tustin A (1947) The nature of the operator's response in manual control, and its implications for controller design. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part IIA: Automatic Regulators and Servo Mechanisms* 94(2):190–206.
- Vaishnavi VK, Kuechler Jr. W (2015) *Design Science Research Methods and Patterns: Innovating Information and Communication Technology*. CRC Press.
- Viola P, Jones M (2001) Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. Em: *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001)*, Kauai, Hawaii USA, vol 1, pp I-511–I-518.
- Vydhyathan A, Bellusci G (2018) The next generation xsens motion trackers for industrial applications. Xsens™. [https://www.xsens.com/download/pdf/documentation/mti/mti\\_white\\_paper.pdf](https://www.xsens.com/download/pdf/documentation/mti/mti_white_paper.pdf). Acedido em 26 de Outubro de 2018.
- Wang P, King C, Shaw S, Millett D, Liu C, Chui L, Nenadic Z, Do A (2013) A co-registration approach for electrocorticogram electrode localization using post-implantation MRI and CT of the head. Em: *6<sup>th</sup> International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, San Diego, USA, pp 525–528.
- Wu Y, Li W, Minoh M, Mukunoki M (2013) Can feature-based inductive transfer learning help person re-identification?. Em: *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2013)*, Melbourne, Australia, pp 2812–2816.
- Xavier KF, da Costa VK, Cardoso RC, Peroba JA, Ferreira AOL, Machado MB, Tavares TA, Rodrigues AS (2017) Visiumouse: An ubiquitous computer vision technology for people with motor disabilities. Em: *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web*, Gramado, Brasil, pp 115–118.
- Xsens™ (2017) MVN BIOMECH. <https://www.xsens.com/products/mvn-biomech/>. Acedido em 25 de Março de 2018.
- Yang HC, Sababha B, Acar C, Rawashdeh O (2010) Rapid prototyping of quadrotor controllers using MATLAB *Real-Time Workshop* (RTW) and dsPICs. Em: *AIAA Infotech@Aerospace*, Atlanta, USA, pp 1–6.
- Yang L, Hanneke S, Carbonell J (2013a) A theory of transfer learning with applications to active learning. *Machine Learning* 90(2):161–189.
- Yang XS (2009) Firefly algorithms for multimodal optimization. Em: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*, Sapporo, Japan, pp 169–178.
- Yang XS (2010a) Firefly Algorithm, Lévy Flights and Global Optimization. Em: pp 209–218. Springer London.
- Yang XS (2010b) *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. Luniver Press.
- Yang XS (ed) (2014a) *Cuckoo Search and Firefly Algorithm. Theory and Applications. Studies in Computational Intelligence*, vol 516. Springer.

- Yang XS (2014b) *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. Elsevier.
- Yang XS, Cui Z, Xiao R, Gandomi AH, Karamanoglu M (eds) (2013b) *Swarm Intelligence and Bio-inspired Computation. Theory and Applications*. Elsevier.
- Yu H (2008) Overview of human adaptive mechatronics. In: *Proceedings of the 9<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Mathematics & Computers In Business and Economics (MCBE'08)*, Bucharest, Romania, pp 152–157.

Controlo em Sistemas de Interação Humano-Máquina  
Rui Azevedo Antunes

